

**DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA LA CONVERSIÓN DE UNA
BICICLETA CONVENCIONAL A ELÉCTRICA**



**YEISON ÑAÑEZ VALDES
1129621**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2018**

**DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA LA CONVERSIÓN DE UNA
BICICLETA CONVENCIONAL A ELÉCTRICA**

**YEISON ÑAÑEZ VALDES
1129621**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Director: Martha Lucia Orozco Gutiérrez
Phd.
martha.orozco.@correounivalle.edu.co

Co-director: Óscar Román Tudela Rangel
MSc.
oscartudelar@hotmail.com

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2018**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
JUSTIFICACIÓN	12
OBJETIVOS	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1. MARCO REFERENCIAL	14
1.1 Bicicletas eléctricas	14
1.2 Sistema eléctrico para la propulsión	15
1.2.1 Motor Eléctrico	15
1.2.2 Batería	16
1.2.3 Controlador	17
1.3 Sistemas para la conversión de la bicicleta	17
1.3.1 Sistema de control por acelerador	17
1.3.2 Sistema de asistencia al pedaleo	17
1.3.3 Especificaciones Técnicas	18
2. MODELADO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA MOTRIZ	19
2.1 Análisis Longitudinal del sistema motriz	19
2.2 Datos requeridos para el análisis longitudinal	20
2.3 Dinámica vehicular	21
2.3.1 Fuerza de resistencia del aire	21
2.3.2 Fuerza gravitacional	22
2.3.3 Fuerza de rozamiento en las ruedas	22
2.3.4 Fuerza de aceleración	22
2.3.5 Torque, potencia y velocidad angular en la rueda de la bicicleta	22
2.3.6 Torque, potencia y velocidad angular en el eje del motor	23
2.4 Ciclo de conducción	23
2.4.1 Torque ponderado	25
2.4.2 Potencia ponderada	26
2.5 Simulación y validación en Matlab	28
2.6 Análisis de escenarios	29
2.6.1 Punto Crítico de Velocidad	29

2.6.2	Punto Crítico Pendiente	30
2.6.3	Punto Crítico Aceleración.....	31
3.	SELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO	33
3.1	Componentes del motor seleccionado.....	34
3.1.1	Estator.....	35
3.1.2	Rotor	36
3.1.3	Sensor Hall.....	36
3.2	Principio de funcionamiento.....	37
3.3	Característica par-velocidad	39
3.3.1	Modelado del motor.....	40
3.4	Criterios para la selección del motor.....	41
3.5	Motor BLDC seleccionado	42
3.5.1	Curvas del motor seleccionado	43
4.	SELECCIÓN DE LA BATERÍA Y CONTROLADOR ELECTRÓNICO	45
4.1	Parámetros electroquímicos de la batería	45
4.1.1	Fuerza electromotriz, voltaje o potencial [E].....	45
4.1.2	Capacidad específica [Q]	45
4.1.3	Energía específica [W]	45
4.1.4	Ciclos de vida	45
4.2	Clasificación de las baterías eléctricas	46
4.2.1	Batería de plomo	46
4.2.2	Batería de níquel	46
4.2.3	Batería de litio	46
4.3	Cálculos para la selección de la batería	46
4.3.1	Consumo.....	47
4.3.2	Capacidad de la batería	47
4.3.3	Energía específica.....	48
4.4	Criterios para la selección de la batería.....	48
4.5	Batería seleccionada	48
4.5.1	Capacidad de la batería seleccionada	49
4.5.2	Energía específica de la batería seleccionada	49
4.5.3	Tiempo de duración de la carga	50
4.5.4	Autonomía	51

4.6	Selección del controlador electrónico del sistema batería-motor	51
4.6.1	Control de velocidad del motor BLDC	52
4.6.2	Criterios para la selección del controlador electrónico	54
4.6.3	Controlador electrónico seleccionado	54
4.6.4	Complementos del sistema de pedaleo asistido PAS	56
4.6.5	Costo de conversión de bicicleta convencional a eléctrica.....	58
4.6.6	Diagrama eléctrico del sistema.	58
4.6.7	Validación del sistema en escenarios continuos.	59
5.	SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DISEÑADO	63
5.1	Resultados de simulación	69
5.1.1	Operación del sistema en el ciclo de conducción.....	69
5.1.2	Operación del sistema con un torque fijo	73
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	76
6.1	Conclusiones	76
6.2	Trabajos futuros.....	77
7.	BIBLIOGRAFÍA	78
8.	ANEXOS	80
8.1	Anexo 1.....	80
8.2	Anexo 2.....	82
8.3	Anexo 3.....	83
8.4	Anexo 4.....	85
8.5	Anexo 5.....	87
8.6	Anexo 6.....	88
8.7	Anexo 7.....	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características de bicicleta a convertir.....	19
Tabla 2 Datos ciclo de conducción de bicicleta.....	24
Tabla 3 Fuerzas sobre la bicicleta en escenario de velocidad máxima.	30
Tabla 4 Requerimientos del sistema en velocidad máxima	30
Tabla 5 Fuerzas sobre la bicicleta en el escenario de pendiente máxima.	31
Tabla 6 Requerimientos del sistema en pendiente máxima.....	31
Tabla 7 Fuerzas sobre la bicicleta en el escenario de aceleración máxima.	32
Tabla 8 Requerimientos del sistema en aceleración máxima.....	32
Tabla 9 Datos de motores BLDC. [18].....	42
Tabla 10 Parámetros nominales del motor BLDC.	47
Tabla 11 Comparación de baterías comerciales.....	49
Tabla 12 Costo de conversión.	58
Tabla 13 Requerimientos escenario de velocidad.....	59
Tabla 14 Datos punto de operación a velocidad máxima.....	60
Tabla 15 Requerimientos escenario de pendiente.	61
Tabla 16 Punto de operación para pendiente a 4 m/s.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Emisiones de diferentes medios de transporte (Kg CO ₂ por persona y Km. [1]	14
Figura 2 Partes de una bicicleta eléctrica. [2].....	15
Figura 3 Bicicleta a convertir GW.	19
Figura 4 Diagrama de fuerzas externas sobre la bicicleta. [8].....	21
Figura 5 Ciclo de conductor urbano norma Portuguesa (NP EN 1988-1). [7] [8] ...	24
Figura 6 Curva de torque en el eje del motor.	25
Figura 7 Curva de potencia en el eje del motor.	26
Figura 8 Curva de potencia en el eje del motor.	27
Figura 9 Diagrama de bloques de ciclo de conducción en Matlab. [14].....	28
Figura 10 Ciclo de conducción mediante Matlab	28
Figura 11 Par en la rueda mediante Matlab.....	29
Figura 12 Potencia en la rueda mediante Matlab.	29
Figura 13 Evaluación de diferentes motores para vehículos eléctricos. [15]	33
Figura 14 Partes del motor BLDC sin escobillas. [16].....	34
Figura 15 Estator motor BLDC. [16].....	35
Figura 16 Formas de la fuerza contra-electromotriz según el tipo de motor. [16]..	35
Figura 17 Configuración de los imanes permanentes. [16].....	36
Figura 18 Ubicación de los sensores de efecto Hall. [16].....	37
Figura 19 Esquema de funcionamiento de un motor BLDC. [17].....	37
Figura 20 Desarrollo de la circunferencia que contiene una barra conductora. [17]	38
Figura 21 Curva característica par-velocidad del motor BLDC. [16].....	39
Figura 22 Motor BLDC HT3525 Crystalyte seleccionado. [18]	43
Figura 23 Curva torque [N.m] vs velocidad angular [R.P.M.]. [18].....	43
Figura 24 Curva potencia [W] vs velocidad angular [R.P.M.]. [18].....	44
Figura 25 Batería Seleccionada 36 V Lithium Battery Pack DLP-01. [21]	49
Figura 26 Curva Torque vs Corriente.	50
Figura 27 Proceso de trabajo del software. [22].....	52
Figura 28 Modulación por ancho de pulsos. [23]	53
Figura 29 Curva Par-Velocidad del motor para diferentes tensiones promedio.	54
Figura 30 Características eléctricas controlador electrónico. [24].....	55
Figura 31 Características del controlador electrónico seleccionado. [24].....	55
Figura 32 Fusible EP-Fuse-50 A. [18].....	56
Figura 33 Sensor de pedaleo. [24]	56
Figura 34 Maneta de frenos. [24].....	57
Figura 35 Panel de control del sistema. [24].....	57
Figura 36 Diagrama del sistema propuesto PAS.....	58
Figura 37 Escenario de Velocidad.....	60
Figura 38 Punto de operación para máxima velocidad.....	60
Figura 39 Escenario de pendiente.....	61

Figura 40 Punto de operación para pendiente a 4 m/s.	62
Figura 41 Diagrama del sistema en Matlab.	63
Figura 42 Bloque para obtener par de carga T_m	63
Figura 43 Modelo de la Batería seleccionada.	64
Figura 44 Parámetros de batería.	64
Figura 45 Curva de descarga de la batería a 11,6 A.	64
Figura 46 Bloque Universal Bridge.	65
Figura 47 Parámetros del inversor.	65
Figura 48 Modelo del motor BLDC.	66
Figura 49 Parámetros del motor BLDC.	66
Figura 50 Bloque Decoder.	67
Figura 51 Tabla Lógica Decoder.	67
Figura 52 Bloque Gates.	68
Figura 53 Conexión de MOSFETS.	68
Figura 54 Tabla Lógica Gates.	68
Figura 55 Curva de carga.	69
Figura 56 Torque desarrollado por el motor.	69
Figura 57 Velocidad de la bicicleta.	70
Figura 58 Velocidad desarrollada por el motor.	70
Figura 59 Corriente de la fase A del motor.	70
Figura 60 Voltaje de la Batería.	71
Figura 61 Corriente de la batería.	71
Figura 62 Porcentaje de carga de la batería.	72
Figura 63 Voltaje alterno promedio.	72
Figura 64 Fuerza Contra-Electromotriz.	72
Figura 65 Torque de carga.	73
Figura 66 Voltaje de Batería.	73
Figura 67 Corriente de Batería.	74
Figura 68 Voltaje Promedio.	74
Figura 69 Corriente de Motor en Fase A.	74
Figura 70 Fuerza Contra-Electromotriz EMF.	75
Figura 71 Velocidad del Motor.	75

RESUMEN

En este trabajo se realizaron los cálculos torque, velocidad y potencia en diferentes condiciones de operación (Velocidad máxima, pendiente máxima y aceleración máxima) de una bicicleta. Estos cálculos definieron los criterios para la selección de los diversos componentes del sistema eléctrico para la conversión de una bicicleta convencional a una eléctrica.

Inicialmente, se presentó un marco teórico en el que se tuvo en cuenta la contaminación atmosférica de todo tipo de vehículos. También se habló de los componentes para la conversión de bicicletas eléctricas. Finalizando con las especificaciones técnicas para la conversión de este tipo de vehículos eléctricos.

Luego se buscó una bicicleta a convertir con sus diferentes características (Peso, radio de rueda), entre otras. También se calcularon los requerimientos equivalentes de torque, velocidad y potencia para un ciclo de conducción determinado. Además se analizaron los diferentes escenarios de operación en el funcionamiento de la bicicleta para una posterior selección del motor eléctrico. Se finalizó simulando el ciclo de conducción mediante el software Matlab.

En seguida se realizó una breve comparación de diversos motores eléctricos para la conversión. Después de realizar la selección del tipo de motor, se habló del funcionamiento y las partes constructivas del motor síncrono (BLDC). Terminando con la selección de un motor comercial que cumpliera con los requerimientos de torque y velocidad.

A continuación se realizaron los cálculos pertinentes para seleccionar una batería eléctrica para el motor trabajando a la máxima eficiencia. Además se presentaron diversos criterios para la selección de la batería. Se realizó una breve comparación de baterías eléctricas comerciales para la selección. También se listaron los criterios para la selección del controlador electrónico. Culminando con la selección del controlador y otros elementos como: Frenos, Analizador del sistema, Fusible de protección y sensor de pedaleo.

Se finalizó el trabajo simulando el sistema en Matlab para verificar su correcto funcionamiento.

Palabras claves: Bicicleta, torque, velocidad, potencia, vehículos eléctricos, motores eléctricos, motor síncrono, batería eléctrica, controlador electrónico.

ABSTRACT

In this work, torque, speed and power were calculated in different operating conditions (maximum speed, maximum slope, maximum acceleration) of a bicycle. These calculations defined the selection criteria of the various components of the electrical system to convert a conventional bicycle into an electric one.

Initially, it was presented a theoretical framework that considered the atmospheric pollution of all kind of vehicles. The components to convert electric bicycles were also discussed. Finally, it was considered the technical specifications to convert this type of electric vehicles.

Later, it was searched a bicycle to convert with its different characteristics (weight, wheel radius, among others). The equivalent torque, speed and power requirements for a given driving cycle were also calculated. In addition, the different operation scenarios in the bicycle working were analyzed for a later selection of the electric motor. It was finished by simulating the driving cycle in Matlab software.

Then, a brief comparison of various electric motors was made for the conversion. After making the selection of the motor type, the operation and the parts of the synchronous motor (BLDC) were discussed. It was finished by selecting a commercial engine that meets the torque and speed requirements.

After that, the relevant calculations were made to select an electric battery for the engine working at maximum efficiency. In addition, various criteria to select the battery were presented. A brief comparison of commercial electric batteries was made for the selection. The criteria to select the electronic controller were listed. It was finish by selecting e controller and other elements such as: Brakes, system analyzer, protection fuse and pedaling sensor.

The work was finalized simulating the system in Matlab to verify its correct functioning.

Keywords: Bike, torque, speed, power, electric vehicles, electric motors, synchronous motor, electric battery, electronic controller.

INTRODUCCIÓN

La bicicleta en sí es un excelente medio de transporte, es rápido, eficiente, saludable e incluso hasta cómodo de usar cuando la climatología lo permite. En nuestro país, a pesar de no ser un país especialmente cuidadoso con el entorno urbano, existe una auténtica revolución, y en ciudades como Cali, Bogotá, Barranquilla y Medellín están haciendo grandes inversiones y promoción de la bicicleta como medio de transporte personal; sin embargo, según el terreno, la distancia o la condición física del usuario, la bicicleta puede resultar algo pesada.

La bicicleta eléctrica disminuye el esfuerzo al pedalear permitiendo recorrer grandes distancias. Una bicicleta eléctrica requiere un sistema eléctrico, el cual generalmente está compuesto por una batería, controlador electrónico y un motor, los cuales deben asegurar que la bicicleta eléctrica alcance las especificaciones operativas para los diferentes escenarios de operación. Es por esto que en este proyecto se presenta el diseño de un sistema eléctrico (batería-controlador-motor) para la conversión de una bicicleta convencional a una eléctrica donde su uso se orienta a la población que usa la bicicleta normal para ir a trabajar o como también para ir a estudiar.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los combustibles fósiles son usados para la obtención de energía. Una de las principales aplicaciones es el usar estos combustibles como fuente de energía para mover los vehículos. Se puede aseverar que el transporte del mundo entero depende de los combustibles fósiles. Hoy en día estos recursos se están agotando por el excesivo uso, como consecuencia de esto se ha elevado considerablemente el precio de los combustibles. Pero el punto más importante es que estos recursos son limitados ya que no pueden regenerarse. A raíz de esto ha venido tomando fuerza la movilidad eléctrica o sostenible.

Los sistemas de movilidad sostenible pretenden disminuir en lo posible el número de vehículos que contribuyen a la contaminación ambiental y sustituirlos por medios de transporte más amigables con el medio ambiente. Las bicicletas eléctricas son sistemas que cumplen la característica de ser un vehículo amigable con el medio ambiente ya que no contamina el aire, no tiene consumo excesivo de energía no renovable y además son vehículos muy silenciosos.

Otro punto importante que se debe tocar es que en términos económicos el consumo de una bicicleta es muy inferior si se compara con otro medio de transporte que utilice un motor de combustión. Debido a la superioridad en eficiencia que poseen los motores eléctricos sobre los motores de combustión estos se perfilan como el futuro para la movilidad. Además se puede decir que las bicicletas eléctricas son las más llamativas en cuanto a vehículos eléctricos debido a la diferencia de precios que se presenta hoy en día, además la inversión en una bicicleta se puede recuperar al transcurrir el tiempo debido al ahorro que conlleva el uso de ésta.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema eléctrico para la transformación de una bicicleta convencional a una con tracción eléctrica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los requerimientos y características de funcionamiento de una bicicleta.
- Determinar los requerimientos torque-velocidad de la bicicleta en las diferentes condiciones de operación.
- Especificar el tipo de motor que se incorporará a la bicicleta teniendo en cuenta las condiciones operativas de torque-velocidad.
- Determinar las características de la batería para el correcto funcionamiento del sistema y determinar su capacidad.
- Especificar el controlador electrónico que se encargará de la gestión energética del sistema batería-motor.

1. MARCO REFERENCIAL

Hoy en día la contaminación atmosférica es un tema que preocupa debido a que la mayor cantidad de emisiones de CO₂ son producidas por los medios de transporte terrestre como se puede ver en la figura 1, concentrándose principalmente en las grandes ciudades. Por éste motivo resulta de gran utilidad el uso de nuevos medios de transporte que reduzcan dicha contaminación. Los vehículos eléctricos están cobrando un gran interés en la actualidad debido a un rápido crecimiento de la tecnología aplicada en este tipo de vehículos además de inversiones e incentivos que se están realizando por parte del gobierno para promover su uso.

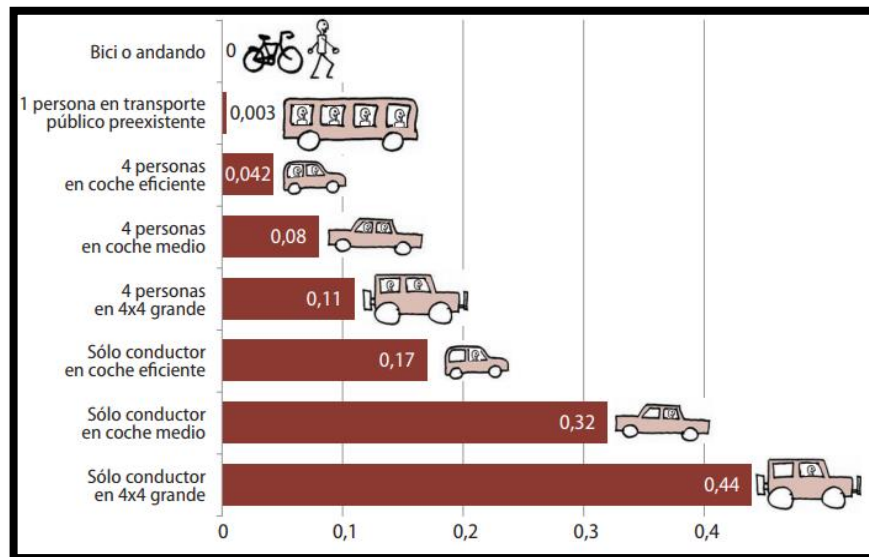


Figura 1 Emisiones de diferentes medios de transporte (Kg CO₂ por persona y Km. [1])

La bicicleta presenta grandes ventajas comparada con otro tipo de vehículos. Una de las razones es debido a que requiere menos potencia y energía para su funcionamiento lo que la hace mucho más eficiente y amigable con el medio ambiente.

1.1 Bicicletas eléctricas

Una bicicleta eléctrica es un tipo de vehículo eléctrico compuesto por una bicicleta a la que se le acopla un motor eléctrico que se encarga de la propulsión del sistema (persona-bicicleta-elementos). La energía necesaria para la operación del motor es suministrada por una batería que se regula mediante el controlador que hace de cerebro del sistema.



Figura 2 Partes de una bicicleta eléctrica. [2]

1.2 Sistema eléctrico para la propulsión

Para lograr que el sistema de propulsión cumpla con la finalidad de ayudar en el avance éste debe contar con tres elementos importantes que son el motor, controlador, batería y otros accesorios como el acelerador o sensor de pedaleo, frenos y un analizador del sistema que permite que el sistema eléctrico funcione adecuadamente. Estos elementos se pueden observar en la figura 2 con un bosquejo de la ubicación sobre la bicicleta.

1.2.1 Motor Eléctrico

El motor eléctrico de la bicicleta transforma la energía eléctrica en energía mecánica para lograr que el ciclista supere los escenarios en donde se encuentre. Las bicicletas eléctricas generalmente utilizan motores de corriente continua. Dentro de éstos, los motores brushless DC "BLDC" (motores sin escobillas) son los más utilizados. Algunas de las características que hay que tener en cuenta de los motores son:

- **Potencia del motor:** La mayoría de los motores que se comercializan tienen una potencia nominal de entre los 180 W y los 1000 W.
- **Tipo de transmisión:** Este es uno de los puntos más importante para el desarrollo del sistema eléctrico de la bicicleta, existen dos tipos de transmisión: El primer tipo de transmisión es la instalación del motor en el eje de pedaleo. Éste tipo de motores asisten desde el primer momento y el motor hace uso de los cambios ya que actúa en los pedales. El inconveniente que se presenta es la complejidad mecánica que hace difíciles y caras las reparaciones. El segundo tipo de transmisión es la instalación del motor en la rueda. Este también es conocido como motor tipo "hub". La ubicación del motor en la parte frontal es la forma más

frecuente ya que al ubicar el motor en la rueda delantera se obtiene una mejor distribución del peso además se facilita el montaje, reparación y los costes de fabricación. [3]

1.2.2 Batería

La batería es el elemento que transforma energía química en eléctrica que se entrega a los componentes del sistema como el motor, controlador, etc. Son recargables y la duración depende de la capacidad. [4]

Existen varios tipos de baterías, a continuación se tienen en cuenta los más utilizados:

- **Baterías de Plomo:** Este tipo de baterías son muy económicas y fiables, pero bastante pesadas. Por este motivo, prácticamente ya no se usan en bicicletas eléctricas. Su duración es de unos dos años o 500 ciclos de carga.
- **Baterías de Ni-Mh:** Son más ligeras que las de plomo, pero son muy delicadas. Requieren una carga y descarga completa y controlada cada cierto tiempo porque tienen efecto memoria. Han quedado eclipsadas por las nuevas tecnologías como las baterías de Litio.
- **Baterías de Litio:** Son las baterías más utilizadas actualmente ya que son más pequeñas y ligeras que las baterías de plomo y níquel. No tienen efecto memoria y son mucho más ecológicas que las anteriores ya que en su composición no se cuenta con níquel o plomo. El gran inconveniente es su precio elevado. Dentro de éstas baterías se pueden encontrar algunas variaciones que se mencionan a continuación:

Litio-ion: Fueron las primeras en aparecer. Tienen una cantidad de energía considerable para su peso y una vida de unos 1000 ciclos. La desventaja que presentan es que son algo delicadas ante golpes y descargas muy rápidas. En cualquiera de los dos casos existe cierto riesgo de explosión.

Litio-Polímero (LiPo): Es la segunda generación de baterías de Litio. Su principal ventaja frente al litio-ion es que soportan golpes y aceptan tasas de descargas muy altas sin peligro de pérdida de líquido o explosión.

Litio Ferroso (LiFe): Son de última generación. Tienen una vida útil de unos 2000 a 3000 ciclos y no tienen ningún peligro de fuga o explosión. Son capaces de suministrar hasta el doble de su capacidad nominal por breves espacios de tiempo. Además, son más seguras y menos contaminantes para el medio ambiente.

Litio-ferrofosfato (LiFePO_4): Es un tipo de batería que utiliza litiofosfato de hierro como material del cátodo. Presenta ventajas sobre las otras de ion litio como pueden ser una mayor estabilidad térmica y química, un ciclo de vida más largo, respecto a las otras de iones de litio. Como inconvenientes las células LiFePO_4 tienen menor voltaje y densidad de energía.

Litio-titanato (LiTiO): La batería de litio-titanato tiene la ventaja de ser más rápida para cargar que otras baterías de ion-litio. Toshiba lanzó una batería de litio-titanato, llamada SuperCharge Ion Battery (SCiB). La batería está diseñada para ofrecer un 90% la capacidad de carga en sólo 10 minutos.

1.2.3 Controlador

La función del controlador es regular la energía suministrada por la batería para poder alimentar el motor eléctrico adecuadamente. Cada controlador suele ser específico para cada tipo de motor, de esta manera se consigue mayor eficiencia regulando la magnitud de corriente que le llegue al motor mediante la modificación de la tensión promedio con que se alimenta los devanados ubicados en el estator. [4]

1.3 Sistemas para la conversión de la bicicleta

Para aplicar el ejercicio de la conversión de la bicicleta se tienen en cuenta dos métodos que son muy comunes en éste tipo de vehículos. [5]

1.3.1 Sistema de control por acelerador

El funcionamiento del sistema de control por acelerador es similar al de las motocicletas. Cuando se activa el acelerador, el motor proporciona la energía suficiente para lograr la propulsión. La velocidad de la bicicleta es proporcional al movimiento del acelerador. Una desventaja de este sistema es que si el acelerador no se usa adecuadamente la batería del sistema sufrirá demasiado afectando la vida útil de la batería. Muchas bicicletas eléctricas funcionan con este sistema pero en muchos países las bicicletas eléctricas con acelerador no están permitidas; solamente la asistencia al pedaleo limitando la velocidad a 25 Km/h desconectando el motor cuando se llega a éste punto.

1.3.2 Sistema de asistencia al pedaleo

El sistema de asistencia al pedaleo a diferencia del anterior sistema cuenta con un sensor de pedaleo en vez del acelerador, se proporciona energía solamente cuando se pedalea. Si el usuario está acostumbrado a montar en una bicicleta tradicional, el sistema de asistencia al pedaleo proporciona una sensación más intuitiva que el modo acelerador. La asistencia al pedaleo presenta buenas características ya que permite centrarse solamente en pedalear y no en tener que mantener el acelerador

en una posición determinada. Una ventaja de este modo de asistencia es que se brinda una autonomía mayor que el modo acelerador.

1.3.3 Especificaciones Técnicas

Para determinar las características técnicas del sistema eléctrico para la conversión de la bicicleta es necesario tener en cuenta la resolución que regula la circulación de las bicicletas eléctricas en el país. La resolución 160 firmada el 2 de octubre de 2017 cita unos puntos importantes que se deben tener en cuenta en la transformación de una bicicleta. Los ítems que se consideran como punto de partida para el diseño del sistema eléctrico para la conversión son los siguientes: [6]

- La Bicicleta equipada con un motor auxiliar con potencia nominal continua no superior a 350 W, que actúa como apoyo al esfuerzo muscular del conductor. Esta potencia se suspenderá cuando el conductor deje de pedalear o el vehículo alcance una velocidad de 25 km/h, el peso nominal de una bicicleta asistida no deberá superar los 35 kg.
- Peso de la persona: 75 Kg (peso de una persona promedio)
- Peso neto: 115 Kg (Carga con la que se dimensionará la potencia del motor y los requisitos de los demás elementos)

2. MODELADO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA MOTRIZ

El sistema con el que se trabajará en el proyecto es el sistema de asistencia al pedaleo cuya principal ventaja es optimizar el uso de la energía eléctrica de la bicicleta; ya que con un acelerador manual se desperdicia demasiada energía y se pierden significativamente las ventajas de la propulsión humana.

2.1 Análisis Longitudinal del sistema motriz

Para el dimensionamiento del grupo propulsor se recurre al análisis longitudinal. En este análisis se tiene en cuenta las fuerzas externas que actúan sobre la bicicleta en donde también se analizará la dinámica de la bicicleta con el fin de obtener datos concretos que definirán las características de los componentes y el modelo del sistema motriz. Para realizar este tipo de análisis se debe conocer el vehículo que se va a convertir para determinar sus características principales. La bicicleta GW fue la seleccionada para la conversión puesto que en la actualidad es una de las marcas más vendidas debido a la calidad de todos sus componentes. Las características técnicas se listan en la siguiente tabla:

Bicicleta a convertir	
MARCA	GW
MODELO	TITAN24NEGVER
CAMBIOS	21 VELOCIDADES
NEUMATICOS	24 CHAOYANG
PESO	13 Kg
MARCO	ACERO
RIN	24 (0,3 m de radio)
BIELA	Shimano m171
USO	Unisex

Tabla 1 Características de bicicleta a convertir.



Figura 3 Bicicleta a convertir GW.

2.2 Datos requeridos para el análisis longitudinal

Para realizar el análisis del cuerpo libre de la bicicleta. Primero se debe especificar una serie de parámetros que definen el comportamiento del sistema motriz. Estos parámetros se determinaron a partir de diversos estudios realizados para este tipo de aplicación en donde las bicicletas tienen estos parámetros concretos y definidos. Estos parámetros se muestran a continuación: [7] [8]

Masa “M”: Masa de la bicicleta eléctrica incluyendo el peso de la persona promedio y el peso de los diferentes elementos.

$$M = 115 \text{ Kg}$$

Aceleración gravitacional “g”: Aceleración debido a la gravedad.

$$g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Coeficiente de resistencia aerodinámico “C_D”: [8]

$$C_D = 0,5$$

Densidad del aire “ρ”: Es la cantidad de aire por unidad de volumen. La densidad de aire es el medio en el cual la bicicleta eléctrica tiene que desplazarse. La densidad del aire disminuye con la altura, también disminuye la presión del aire y se reduce la temperatura. Este parámetro se obtiene con la altitud sobre el nivel del mar más baja con una altitud promedio de 1 msnm. [9]

$$\rho = 1,23 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Área frontal de la bicicleta “A_f”: Área frontal de la bicicleta. [10]

$$A_f = 0,5 \text{ m}^2$$

Coeficiente de fricción de las ruedas “C_f”: Coeficiente de fricción de las ruedas. [10]

$$C_f = 0,013$$

Inclinación del terreno “θ”: Pendiente a la cual se enfrentará la bicicleta.

$$\theta = 7\%$$

Relación de transmisión: Ésta relación afectara dependiendo de donde se ubique el motor. Si se ubica en el eje de pedaleo los cálculos deberán de afectarse por la relación de transmisión Plato-piñón.

$$n = 1$$

Radio de la rueda “R”: El radio de la rueda es uno de los parámetros más importantes junto con la masa de todo el sistema.

$$R = 0,3 \text{ m}$$

2.3 Dinámica vehicular

Basándose en el esquema de cuerpo libre y el análisis de fuerzas externas sobre la bicicleta, se establecen una serie de ecuaciones que permiten conocer el comportamiento de ésta bajo distintas condiciones de velocidad e inclinación del plano. El diagrama de fuerzas externas actuantes sobre la bicicleta se pueden ver en la siguiente figura: [7] [8]

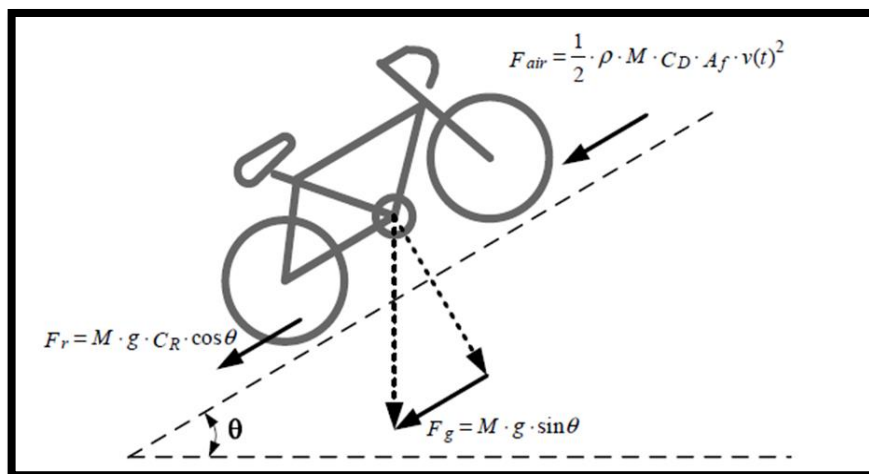


Figura 4 Diagrama de fuerzas externas sobre la bicicleta. [8]

Del análisis longitudinal se obtiene la ecuación general de fuerzas que actúan sobre la bicicleta como se puede ver a continuación:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{aire}} + F_{\text{gravitacional}} + F_{\text{rozamiento}} + F_{\text{aceleracion}}$$

E.C. 1

2.3.1 Fuerza de resistencia del aire

La resistencia del aire actúa sobre los objetos a medida que viaja a través del aire. Esta fuerza se opone al movimiento y se incrementa considerablemente a grandes velocidades dependiendo del área de oposición. [11]

$$F_{\text{aire}} = \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v(t)^2$$

E.C. 2

2.3.2 Fuerza gravitacional

El peso tiene una componente que se genera cuando el vehículo circula por un plano inclinado con respecto a uno horizontal. [11]

$$F_g = M * g * \sin \theta$$

E.C. 3

2.3.3 Fuerza de rozamiento en las ruedas

La resistencia a la rodadura o rozamiento de rodadura o arrastre rodante, es la resistencia que se produce cuando un objeto redondo como una pelota o neumático rueda sobre una superficie plana, en línea recta con un movimiento de velocidad constante. Es causada principalmente por la deformación del objeto, la deformación de la superficie, o ambas cosas. [11]

$$F_r = M * g * C_r * \cos \theta$$

E.C. 4

2.3.4 Fuerza de aceleración

Para el cambio de velocidad se requiere de una fuerza que acelere todo el vehículo que se representa mediante la siguiente ecuación: [11]

$$F_a = M * a(t)$$

E.C. 5

2.3.5 Torque, potencia y velocidad angular en la rueda de la bicicleta

Al tener los parámetros se procede a encontrar la potencia, torque y velocidad en la rueda que debe satisfacer el motor. Se asume que el vehículo va recorriendo una línea recta a velocidad constante. Una vez calculada la resistencia total al avance ($F_{\text{aire}} + F_g + F_r + F_a$), se puede calcular la potencia necesaria para el avance del vehículo a una determinada velocidad. La potencia se puede expresar de muchas maneras dependiendo el contexto. En este caso la potencia se ve como la cantidad de fuerza que puede aplicar a una cierta velocidad o la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. [11]

La velocidad angular en R.P.M. se calculará de la siguiente manera:

$$W_{veh} = \frac{V * 60}{2 * \pi * R} \quad \text{E.C. 6}$$

La potencia requerida por el sistema se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$P_{veh} = P_{aire} + P_g + P_r + P_a \quad \text{E.C. 7}$$

Donde:

$$P_{veh} = (F_{aire} + F_{gravidad} + F_{rozamiento} + F_{aceleracion}) * v(t) \quad \text{E.C. 8}$$

Entonces el torque de tracción del sistema se puede estimar de la siguiente manera:

$$T_{veh} = T_{aire} + T_g + T_r + T_a \quad \text{E.C. 9}$$

Donde:

$$T_{veh} = (F_{aire} + F_{gravidad} + F_{rozamiento} + F_{aceleracion}) * R \quad \text{E.C. 10}$$

2.3.6 Torque, potencia y velocidad angular en el eje del motor

Para obtener los requerimientos en el eje del motor debe afectarse por la relación plato-piñón de la que se habló anteriormente. La velocidad angular en R.P.M. se calculará de la siguiente manera: [11]

$$W_m = W_{veh} * n \quad \text{E.C. 11}$$

Entonces el torque de tracción del sistema se puede estimar de la siguiente manera:

$$T_m = \frac{T_{veh}}{n} \quad \text{E.C. 12}$$

La potencia requerida por el sistema se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$P_m = \left(\frac{2 * \pi * W_m}{60} \right) * T_m \quad \text{E.C. 13}$$

2.4 Ciclo de conducción

Luego de tener las fuerzas externas que actúan sobre la bicicleta se define un ciclo de velocidad en función del tiempo. Éste ciclo se utilizara para encontrar una potencia y un torque ponderado con la ayuda de las anteriores ecuaciones para la

selección del motor. El ciclo de conducción es una secuencia de velocidades asociadas a una secuencia de tiempos que representan la forma en que el ciclista transita en un determinado medio en línea recta. Existen diferentes ciclos de conducción. El ciclo seleccionado fue el de la norma Portuguesa (NP EN 1988-1) el cual se puede visualizar a continuación:

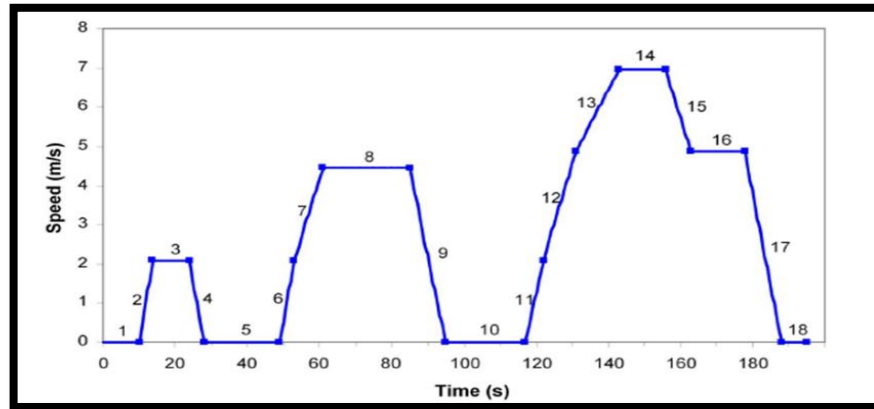


Figura 5 Ciclo de conductor urbano norma Portuguesa (NP EN 1988-1). [7] [8]

Del anterior ciclo de conducción se definen varios trayectos en donde se cuenta con una velocidad y una aceleración. Con ayuda de las ecuaciones descritas en la sección 2.3 se calcula el torque y potencia para dicho trayecto.

Punto	Velocidad [m/s]	Aceleración [m/s ²]	Torque [N.m]	Potencia [W]
(0-10]	0	0	0	0
(10-13]	2	0,66	27,2	182,33
(13-24]	2	0	4,58	30,53
(24-28]	1	-0,5	0	0
(28-49]	0	0	0	0
(49-61]	4,5	0,375	18,27	274
(61-85]	4,5	0	5,33	79,94
(85-94]	2,25	-0,5	0	0
(94-117]	0	0	0	0
(117-143]	7	0,26	15,63	364,59
(143-156]	7	0	6,66	155,29
(156-163]	5,9	-0,28	0	0
(163-178]	4,9	0	5,50	89,88
(178-188]	2,45	-0,49	0	0
(188-194]	0	0	0	0

Tabla 2 Datos ciclo de conducción de bicicleta.

Debido a que el ciclo anterior es el de una persona promedio. La selección del motor se hará tomando en cuenta que el motor trabajará siguiendo ciclos iguales y repetidos con variación de carga como se puede ver en la tabla anterior con el

cambio del torque a lo largo del ciclo. Por esta razón puede utilizarse los siguientes métodos para la selección del motor: Método del par equivalente, método de la potencia equivalente.

2.4.1 Torque ponderado

A partir del ciclo de conducción y de las ecuaciones anteriormente definidas se procede a determinar la curva de par que debe satisfacer el sistema. Se basa en reemplazar, para el cálculo, el par de carga variable del motor durante un ciclo, por un par equivalente que produciría en el motor las mismas pérdidas que el par real, es decir, el mismo calentamiento. [12] [13]

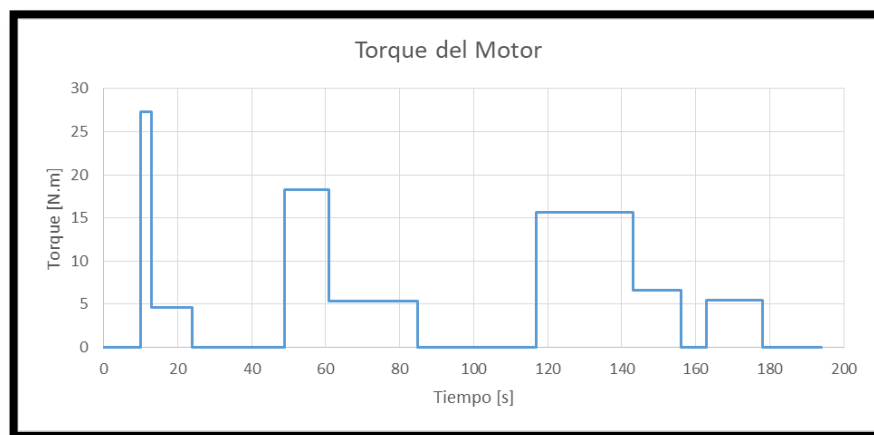


Figura 6 Curva de torque en el eje del motor.

Para el cálculo del par equivalente del motor se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\sum T_i^2 t_i}{\frac{T_i}{3} + \sum t_r}} = 10,42 \text{ N} * m \quad \text{E.C. 14}$$

T_i = Torque durante los periodos de carga t_i .

t_i = Tiempo de duración de los intervalos de carga.

t_r = Tiempo de duración de los intervalos sin carga.

Para la selección del motor el primer paso que se debe hacer es determinar el par equivalente durante un ciclo de trabajo. Finalizando con la selección del motor tal que el par nominal del motor sea igual o mayor que el par equivalente encontrado

anteriormente. Entonces al cumplir con éste criterio puede considerarse que el calentamiento del motor es admisible.

2.4.2 Potencia ponderada

Al igual que el torque ponderado la potencia ponderada se determina a partir del ciclo de conducción que se seleccionó por norma. Para cada punto se determina la potencia requerida hasta obtener la curva completa de potencia para más adelante calcular la potencia equivalente en donde se tiene en cuenta el tipo de servicio del motor S9 de la clasificación presentada por la IEC 34-1 de 1998. Definido como un servicio con variaciones no periódicas de carga y de velocidad. El método se basa en reemplazar, para el cálculo, la potencia requerida del motor durante un ciclo, por una potencia equivalente que produciría en el motor las mismas pérdidas que la potencia real, es decir, el mismo calentamiento. [12] [13]

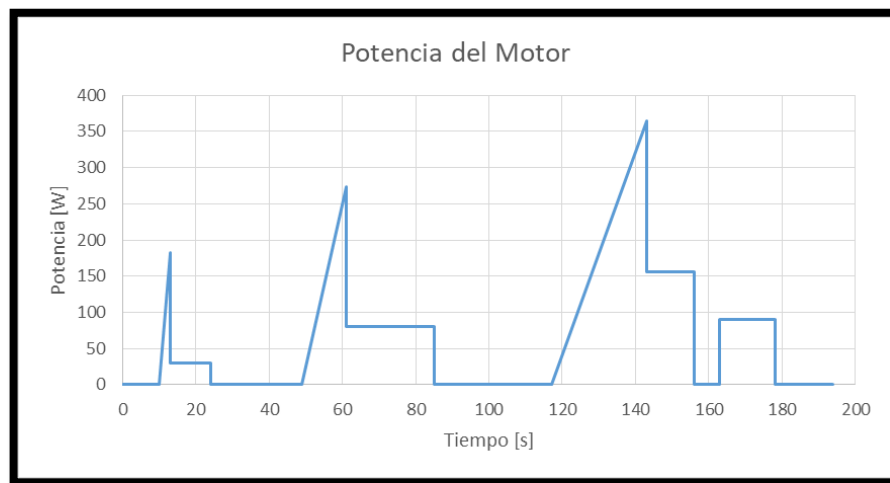


Figura 7 Curva de potencia en el eje del motor.

Para la aplicación del método en las zonas donde la potencia crece linealmente se toma la potencia mayor en dicho intervalo de crecimiento.

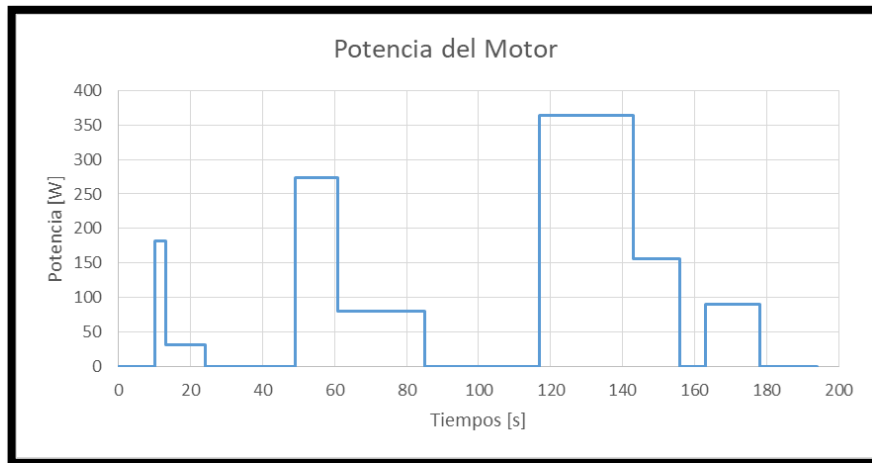


Figura 8 Curva de potencia en el eje del motor.

Para el cálculo de la potencia equivalente mediante la siguiente ecuación:

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\frac{T_i}{3} + \sum t_i}} = 194,23 \text{ W} \quad \text{E.C. 15}$$

Donde:

P_i = Potencias consumidas durante los periodos de carga t_i .

t_i = Tiempo de duración de los intervalos de carga.

t_r = Tiempo de duración de los intervalos sin carga.

Tomando una eficiencia del 80% para el motor que se vaya a elegir. La nueva potencia que debe tener el motor será la siguiente:

$$P_{eq} = \frac{194,23 \text{ W}}{0,8} = 242,788 \text{ W} \quad \text{E.C. 16}$$

El procedimiento para la aplicación del método de la potencia equivalente será primero que todo determinar la potencia equivalente durante un ciclo de trabajo. Terminando con la selección del motor eligiendo un motor cuya potencia nominal sea mayor o igual a la potencia equivalente encontrada. Al cumplir este ítem puede considerarse que el calentamiento del motor sea admisible.

2.5 Simulación y validación en Matlab

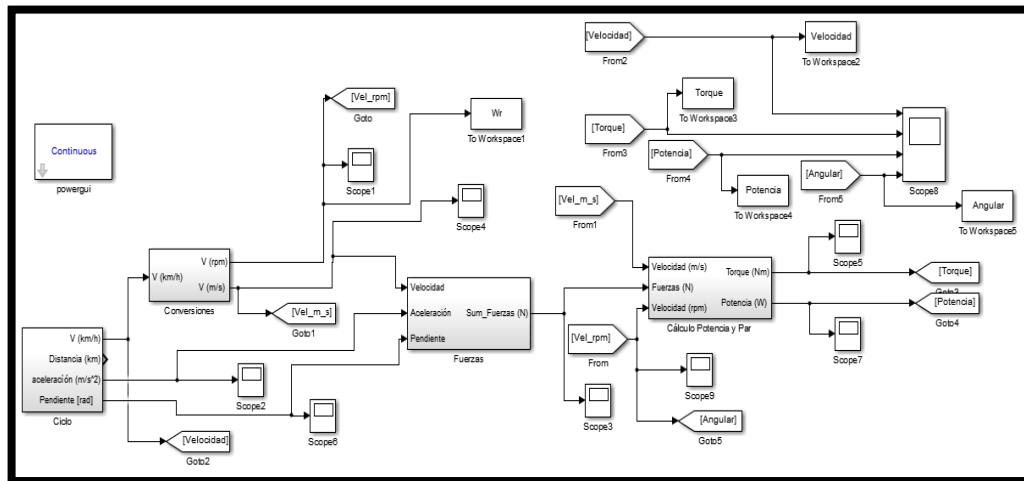


Figura 9 Diagrama de bloques de ciclo de conducción en Matlab. [14]

El modelo consiste en un bloque llamado ciclo donde se introducen diversos puntos en Km/h para obtener la curva del ciclo planteado. El bloque de conversiones realiza la transformación de la velocidad a m/s y a R.P.M. donde se tiene en cuenta el radio de la rueda. El bloque de fuerzas suma todas las fuerzas externas que actúan sobre la bicicleta y por último se tiene el bloque de cálculo de potencia y par en el eje del motor que posteriormente se usara como carga del motor para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. El resultado que arroja el sistema simulado en el software Matlab es el siguiente:

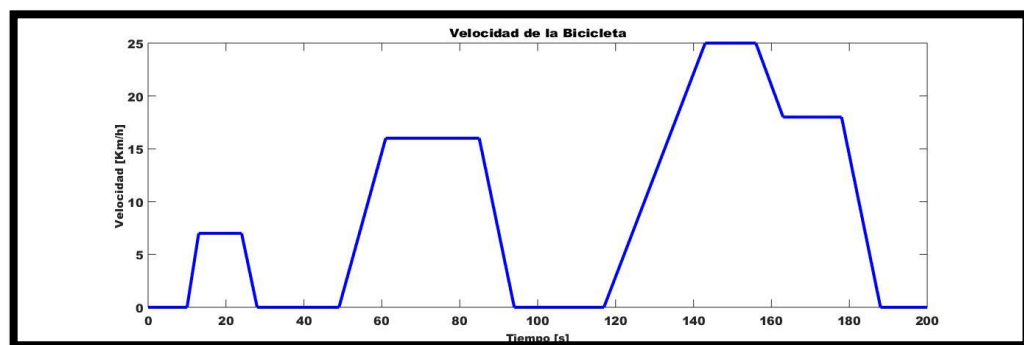


Figura 10 Ciclo de conducción mediante Matlab

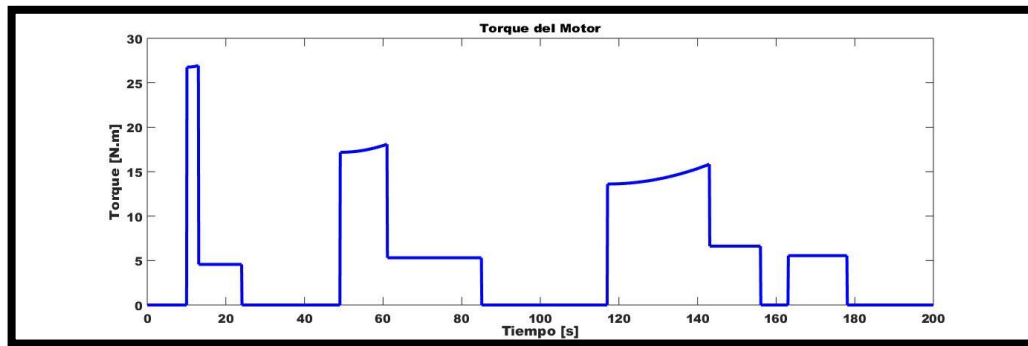


Figura 11 Par en la rueda mediante Matlab.

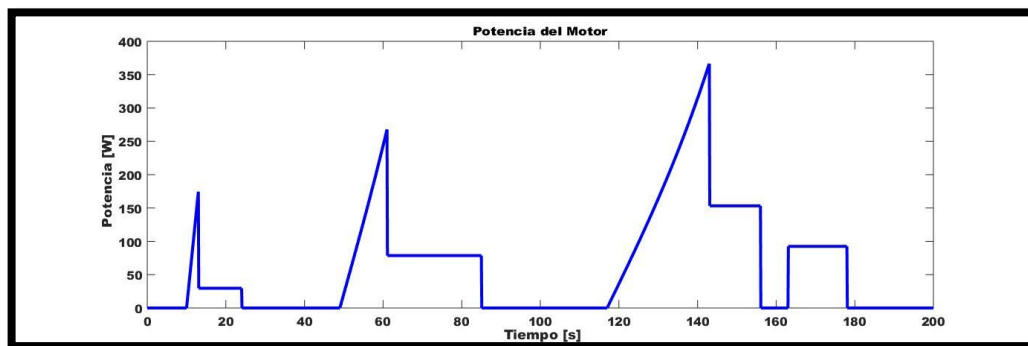


Figura 12 Potencia en la rueda mediante Matlab.

2.6 Análisis de escenarios

Utilizando el esquema de fuerzas sobre el vehículo se establecen ecuaciones para conocer el comportamiento de éste bajo distintas condiciones de operación en los cuales el motor tiene que ser capaz de suministrar: velocidad máxima, pendiente máxima y aceleración máxima. [11]

2.6.1 Punto Crítico de Velocidad

El punto crítico de velocidad se da cuando el vehículo alcanza los 25 Km/h en un terreno plano que por lo general es el que más va a enfrentar el vehículo debido a las condiciones geográficas de las ciudades.

$$M_{efec} = 115 \text{ Kg}$$

$$V = V_{max} = 25 \frac{\text{Km}}{\text{h}} = 7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\theta = 0^\circ$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_{aceleracion}} = \frac{25 - 25}{t_{aceleracion}} = 0 \frac{m}{s^2}$$

Entonces:

Fuerzas sobre la bicicleta			
Fuerza del aire	Fuerza gravitacional	Fuerza de fricción sobre las ruedas	Fuerza de aceleración
$\frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v(t)^2$	$M * g * \sin \theta$	$M * g * C_r * \cos \theta$	$M * a(t)$
7,53 N	0 N	14,65 N	0 N

Tabla 3 Fuerzas sobre la bicicleta en escenario de velocidad máxima.

Los requerimientos del sistema se calculan a partir de las fuerzas externas que actúan sobre la bicicleta, entonces:

Requerimientos del sistema		
Torque del vehículo	Velocidad angular del vehículo	Potencia del vehículo
$[\sum (F)] * R$	$\frac{V * 60}{2 * \pi * R}$	$[\sum (F)] * V$
6,66 N.m	222,82 R.P.M.	155,29 W

Tabla 4 Requerimientos del sistema en velocidad máxima

2.6.2 Punto Crítico Pendiente

El punto crítico de pendiente se da cuando la bicicleta transita en un terreno inclinado a una velocidad promedio con la cual un ciclista común y corriente es capaz de alcanzar la cual se muestra a continuación:

$$V = 2 \frac{m}{s}$$

Se considera una pendiente máxima de aproximadamente un 7% y una aceleración de cero. Entonces la inclinación será:

$$\theta = \theta_{max} = \arctan\left(\frac{\%}{100}\right) = \arctan\left(\frac{7}{100}\right) = 0,07 \text{ rad}$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_{aceleracion}} = \frac{15 - 15}{t_{aceleracion}} = 0 \frac{m}{s^2}$$

Entonces se procede a calcular las fuerzas externas que actúan sobre la bicicleta durante el escenario:

Fuerzas sobre la bicicleta			
Fuerza del aire	Fuerza gravitacional	Fuerza de fricción sobre las ruedas	Fuerza de aceleración
$\frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v(t)^2$	$M * g * \sin \theta$	$M * g * C_r * \cos \theta$	$M * a(t)$
2,46 N	78,82 N	14,62 N	0 N

Tabla 5 Fuerzas sobre la bicicleta en el escenario de pendiente máxima.

Entonces los requerimientos del sistema los cuales tiene que satisfacer el motor serán los siguientes:

Requerimientos del sistema		
Torque del vehículo	Velocidad angular del vehículo	Potencia del vehículo
$[\sum (F)] * R$	$\frac{V * 60}{2 * \pi * R}$	$[\sum (F)] * V$
28,77 N.m	127,32 R.P.M.	383,60 W

Tabla 6 Requerimientos del sistema en pendiente máxima.

2.6.3 Punto Crítico Aceleración

El punto crítico en aceleración se da cuando la bicicleta pasa del estado de reposo a una velocidad de 2 m/s en 3 segundos como se observa en el ciclo de velocidad.

La aceleración se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$a(t) = \frac{V_2 - V_1}{t_{aceleracion}}$$

El tiempo en alcanzar los 2 m/s es aproximadamente 3 seg.

$$a = a_{max} = \frac{2}{3} = 0.67 \frac{m}{s^2}$$

Entonces a partir de la aceleración se encuentran el valor de cada fuerza externa actuante. Se debe tener en cuenta que la fuerza de aceleración influye de manera considerable en comparación con las otras fuerzas.

Fuerzas sobre la bicicleta			
Fuerza del aire	Fuerza gravitacional	Fuerza de fricción sobre las ruedas	Fuerza de aceleración
$\frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v(t)^2$	$M * g * \sin \theta$	$M * g * C_r * \cos \theta$	$M * a(t)$
0,62 N	0 N	14,65 N	77,05 N

Tabla 7 Fuerzas sobre la bicicleta en el escenario de aceleración máxima.

Los requerimientos del sistema serán:

Requerimientos del sistema		
Torque del vehículo	Velocidad angular del vehículo	Potencia del vehículo
$[\sum (F)] * R$	$\frac{V * 60}{2 * \pi * R}$	$[\sum (F)] * V$
27,69 N.m	63,66 R.P.M.	184,63 W

Tabla 8 Requerimientos del sistema en aceleración máxima.

Se observa que el torque máximo que tiene que dar el motor es de aproximadamente 29 N.m donde la batería debe ser capaz de suministrar la corriente necesaria para la producción de éste par en el eje.

3. SELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

Para la selección se realiza una comparación entre diversos tipos de motores usados en este tipo de aplicación donde se tiene en cuenta potencia, eficiencia y costo, entre otras, para una correcta elección. Las características de los motores se listan a continuación:









<i>Propulsion Systems</i>				
<i>Characteristics</i>	DC	IM	PM	SRM
<i>Power Density</i>	2.5	3.5	5	3.5
<i>Efficiency</i>	2.5	3.5	5	3.5
<i>Controllability</i>	5	5	4	3
<i>Reliability</i>	3	5	4	5
<i>Technological maturity</i>	5	5	4	4
<i>Cost</i>	4	5	3	4
Σ Total	 22	 27	 25	 23

Figura 13 Evaluación de diferentes motores para vehículos eléctricos. [15]

En la figura 13 se presenta una calificación de 0 a 5 para cada característica donde 5 es el valor máximo. Se verifica el motor DC con escobillas (primera columna), el motor de inducción representado por IM, el motor de imanes permanentes PM sin escobillas y el motor de reluctancia variable SRM. En la última columna se presenta la suma total de la calificación a cada motor.

Como se observa en la figura 13 el motor que presenta mejores prestaciones para la conversión es el motor de inducción seguido por el motor de imanes permanentes. Para esta aplicación el motor BLDC que en realidad es un motor síncrono de imanes permanentes insertos en el rotor es el más utilizado en la actualidad debido a que presenta una mayor prestación en cuanto a potencia, eficiencia que es prioridad en la conversión.

El motor sin escobillas “BLDC” es un motor síncrono con imán permanente en el rotor (parte móvil) y devanado en el estator (parte fija). El imán permanente crea un campo magnético constante mientras que los devanados del estator crean un campo magnético giratorio. El rotor equivalente a un imán de barra es atraído por la fase del estator que está energizada. Utilizando una conmutación de fases con ayuda de sensores hall se crea y se mantiene el campo magnético variable en el estator logrando que el rotor persiga a los polos electromagnéticos creados por los

devanados del estator. Este tipo de motores presenta muchas ventajas sobre los motores con escobillas de corriente continua y motores de inducción. Algunas de estas son:

- Mejores características de velocidad frente a torque.
- Alta respuesta dinámica.
- Alta eficiencia.
- Larga vida útil.
- Funcionamiento silencioso.
- Mayores rangos de velocidad.
- No produce chispas lo que favorece a la seguridad de la persona.
- Mejor relación par-motor-tamaño.
-

Además, la relación de par entregado respecto al tamaño del motor es mayor, por lo que es útil en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos.

3.1 Componentes del motor seleccionado

La configuración del motor BLDC puede ser de 1 fase, 2 fases o 3 fases. El número de fases determina el número de devanados. Los devanados generalmente están ubicados en el estator construido por láminas apiladas, mientras que el rotor estará compuesto por un imán permanente de alta densidad. En este caso el campo magnético del estator y el campo del rotor giran a la misma frecuencia a diferencia de los motores de inducción donde los campos magnéticos giran a diferente velocidad generándose un deslizamiento. Los componentes del motor pueden observarse en la figura 14. [16]

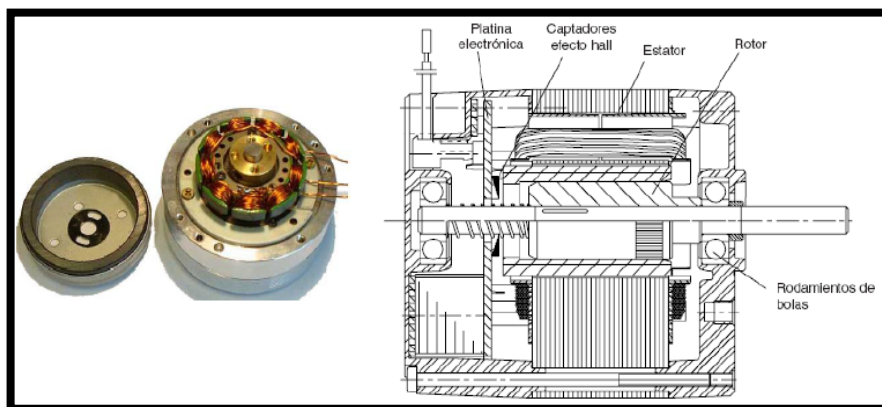


Figura 14 Partes del motor BLDC sin escobillas. [16]

3.1.1 Estator

El circuito magnético del estator está formado por láminas de material ferromagnético para reducir las pérdidas en el núcleo. Los tres devanados del motor están distribuidos por la periferia del estator conectado en delta o en estrella. El estator se puede observar a continuación:



Figura 15 Estator motor BLDC. [16]

Existen dos tipos de motores BLDC trapezoidales y sinusoidales. El modelo del motor viene dado gracias a la interconexión entre anillos de los devanados. Con esta interconexión se genera una fuerza contra-electromotriz de forma trapezoidal para el primero y sinusoidal para el segundo como se puede observar en la siguiente figura.

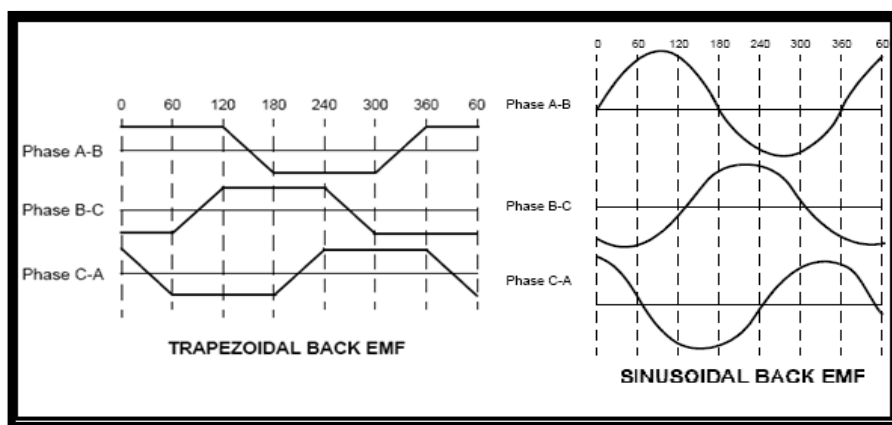


Figura 16 Formas de la fuerza contra-electromotriz según el tipo de motor. [16]

3.1.2 Rotor

El rotor como se mencionó anteriormente está compuesto por imanes permanente de 2 hasta 40 pares de polos magnéticos para motores tipo hub donde se alterna los polos entre norte y sur. En la figura se puede observar la configuración del rotor desde 2 pares de polos hasta 3 pares de polos o 6 polos magnéticos.



Figura 17 Configuración de los imanes permanentes. [16]

La densidad de campo magnético del rotor depende del material de fabricación. Los imanes más comunes son los de ferrita debido a su bajo costo. En la actualidad se están desarrollando imanes de tierras raras puesto que permiten disminuir el tamaño del rotor. Algunos ejemplos de tierras raras se mencionan a continuación: Neodimio (Nd), la aleación de Samario y Cobalto (SmCo) y la aleación de Neodimio, Hierro y Boro (NdFeB).

3.1.3 Sensor Hall

El motor BLDC no posee escobillas en su interior para alimentar sus bobinas, debido a esto debe de usarse sensores que permitan identificar la posición en todo momento del rotor por parte de un circuito electrónico, para así lograr una correcta conmutación de las fases del estator. Los sensores más comunes para realizar este trabajo son los sensores hall que usualmente están ubicados en la parte fija del estator. La mayor parte de motores sin escobillas poseen tres sensores uno por cada fase. Estos sensores emiten una señal de voltaje de alto o bajo dependiendo de la posición del rotor. La ubicación de los sensores en el motor se puede visualizar en la siguiente figura.

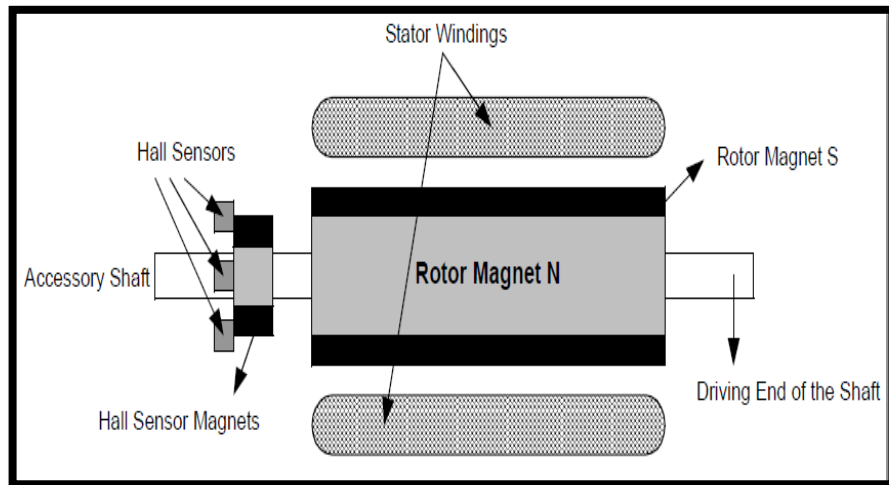


Figura 18 Ubicación de los sensores de efecto Hall. [16]

Los tres sensores hall brindan una secuencia de seis pasos para completar una revolución eléctrica que va de 1 hasta 6 es decir que cada 60 grados uno de los tres sensores cambia de estado, también la conmutación se actualiza cada 60 grados. La secuencia de conmutación de las fases se puede visualizar en la figura 16.

3.2 Principio de funcionamiento

Como se dijo anteriormente el motor está compuesto por un rotor con imanes permanentes y en un estator con bobinas fijas. El rotor puede ir por dentro del estator o por fuera del estator, siendo éste último el más comúnmente usado.

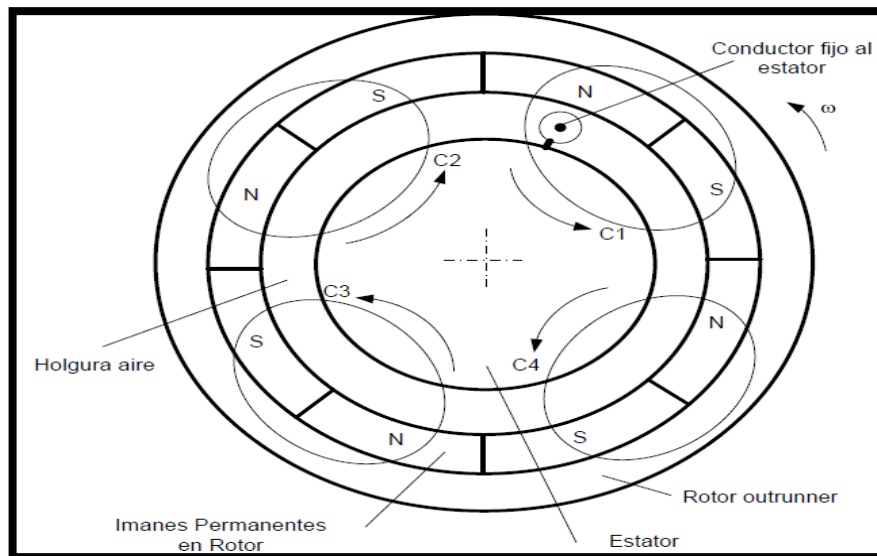


Figura 19 Esquema de funcionamiento de un motor BLDC. [17]

En la figura 19 se puede observar que el rotor está fuera. En este caso el rotor posee 8 polos magnéticos con polos alternados, esto genera 4 pares de polos magnéticos simultáneos en el motor. Para entender el funcionamiento del motor se procede a analizar una barra del motor. Esto se puede realizar al suponer que la circunferencia se corta y se estira como se puede ver a continuación:

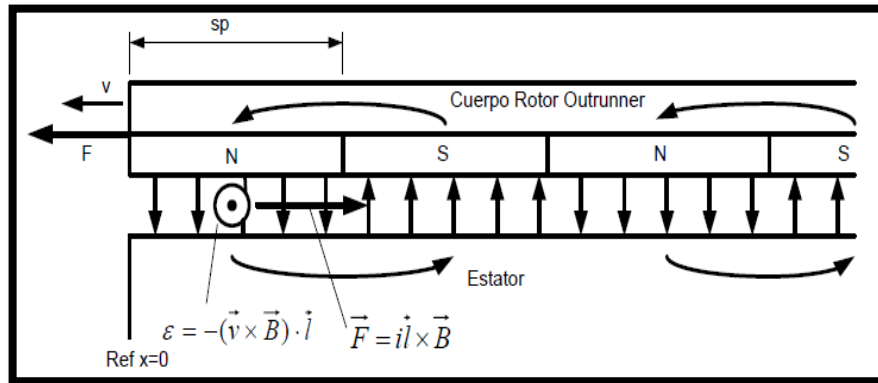


Figura 20 Desarrollo de la circunferencia que contiene una barra conductora.
[17]

Al circular una corriente en la barra en presencia de un campo magnético se produce una fuerza denominada fuerza de Lorentz, este fenómeno se puede observar en la anterior figura. A su vez el rotor siente la misma fuerza pero en sentido contrario en virtud del principio de acción y reacción, lo que hace que el rotor comience a girar. Es decir el rotor adquiere una velocidad a la izquierda para este ejemplo. Por último la barra ve un campo magnético variable producido por el movimiento del rotor, al suceder esto en la barra se induce una fuerza contra-electromotriz.

El inconveniente de este motor es que a corriente constante el motor cambia la dirección de la fuerza cambiando la dirección del torque. Para solucionar éste problema se debe cambiar la dirección de la corriente cada vez que cambia de polo magnético para lograr un torque en una sola dirección. Para que el motor funcione correctamente se debe generar el patrón de circulación de corriente dado por la posición del rotor respecto a las bobinas. Para determinar los instantes de conmutación, o lo que es lo mismo, la posición angular del rotor, existen dos métodos:

- **Conmutación basada en sensores Hall:** Se basa en salida de los sensores hall, para conmutar las fases que deben estar activas. La ventaja de la conmutación utilizando sensores Hall es que el algoritmo de control es simple y fácil de entender. También se puede utilizar para arrancar el motor a una velocidad muy baja.

- **Conmutación sin sensores (sensorless):** En la técnica de conmutación sin sensores, la FCEM inducida en el devanado que se encuentra en reposo, se utiliza para determinar el momento de la conmutación. Cuando la fuerza contra-electromotriz inducida en el devanado en reposo es igual a la mitad de la tensión del bus, la conmutación se completa. La ventaja que presenta la conmutación sin sensores, es que hace que el diseño de hardware sea más simple ya que no hay sensores o circuitos de interfaz asociados. Las desventajas que presenta es que requiere un algoritmo de control relativamente complejo, y cuando la magnitud de la fuerza contra-electromotriz inducida es baja y no admite bajas velocidades del motor.

3.3 Característica par-velocidad

Una de las características más importantes para la selección de un motor es conocer el comportamiento del motor en cuanto a par-velocidad. Para relacionar la potencia, torque y la velocidad se realiza mediante la siguiente ecuación general:

$$P = T * W$$

E.C. 17

Donde:

P = Es la potencia del motor.

T = Es el par motor o torque.

W = Es la velocidad angular de giro del motor.

De la ecuación se puede ver que a potencia constante, el torque y la velocidad de giro son inversamente proporcionales

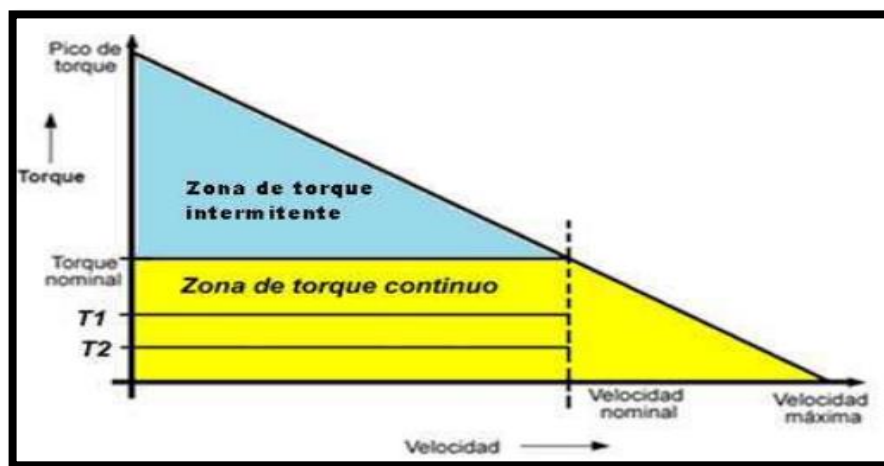


Figura 21 Curva característica par-velocidad del motor BLDC. [16]

En la figura 21 se puede ver un ejemplo de la característica par velocidad para los motores BLDC, además, se puede ver dos de los parámetros más importantes del motor el par máximo (T_p) y el par nominal (T_R) del motor. Para una operación continua el motor solo debe cargarse hasta el par nominal (T_p). El motor puede funcionar hasta la velocidad máxima, que puede ser hasta un 150% de la velocidad nominal. Para operaciones no continuas de arranques y frenadas el motor es capaz de dar un par superior al nominal para vencer el par de carga y salir del reposo.

3.3.1 Modelado del motor

El motor funciona con dos fases que se activan dependiendo de la posición del rotor que se puede saber a través de sensores Hall. El circuito eléctrico para una fase se puede representar mediante la siguiente ecuación: [17]

$$V_f = i_f * R_f + L_f * \frac{di}{dt} + K_f * \Phi_f * W_f \quad \text{E.C. 18}$$

Donde:

R_f = Resistencia de fase.

L_f = Inductancia por fase.

K_f = Constante fuerza contra-electromotriz.

Φ_f = Flujo magnético.

Entonces se tiene que la frecuencia de un ciclo de imán W_f está relacionada con la velocidad angular mecánica W_m por la siguiente expresión:

$$W_f = \frac{N_{\text{bobinas}}}{2} * W_m \quad \text{E.C. 19}$$

El motor funcionara de a dos fases conectadas en serie las cuales se alimentaran mediante un inversor sino sería imposible su funcionamiento. Cuando el motor tiene dos fases activas el comportamiento eléctrico del motor se describe mediante la siguiente ecuación:

$$V_B = i_f * 2 * R_f + 2 * L_f * \frac{di}{dt} + k * \Phi * W_m \quad \text{E.C. 20}$$

Típicamente el efecto de la inductancia L_f es de menor importancia por lo tanto se puede simplificar y obtener:

$$V_B = i_F * 2 * R_f + k * \emptyset * W_m \quad \text{E.C. 21}$$

Por otra parte el torque que produce el motor es la suma de la contribución de las dos fases que están instantáneamente activas. Por lo tanto:

$$T_m = 2 * T_f = 2 * K_f * \emptyset_f * i_F * \frac{N_{bobinas}}{2} \quad \text{E.C. 22}$$

$$T_m = K * \emptyset * i_F \quad \text{E.C. 23}$$

Entonces el modelo matemático aproximado del motor BLDC será:

$$V_{Bateria} = i_F * 2 * R_f + k * \emptyset * W_m \quad \text{E.C. 24}$$

$$T_m = K * \emptyset * i_F \quad \text{E.C. 25}$$

El modelo matemático del motor del motor es muy parecido al motor DC con imanes permanente.

3.4 Criterios para la selección del motor

Para la selección del motor se recurre al método de torque ponderado o equivalente tiene que ser menor que el torque nominal del motor que se vaya a elegir. Según el análisis realizado en el capítulo 2, sección 2.4.1, ecuación 14 el torque nominal requerido es el siguiente:

$$T_n \geq 10,42 \text{ N.m} \quad \text{E.C. 26}$$

Además del anterior método se usa el método de la potencia ponderada en donde el torque nominal del motor debe ser superior o igual a la potencia equivalente que se eligió para dicho ciclo definido según el análisis realizado en el capítulo 2, sección 2.4.2, ecuación 16 la potencia nominal requerido es el siguiente:

$$P_n \geq 242,788 \text{ W} \quad \text{E.C. 27}$$

Para la selección del motor se recurre al ciclo de conducción presentado en el capítulo 2 para no sobredimensionar el motor que se vaya a seleccionar. Ya que al seleccionar el motor con los escenarios máximos en donde transitara la bicicleta la

potencia del motor sería demasiado grande para lo que en realidad se necesitaría para la aplicación.

3.5 Motor BLDC seleccionado

Para la selección del motor se tienen en cuenta varias opciones comerciales las cuales se detallan en el Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4. Para la selección del motor se parte analizando que el torque nominal y potencia nominal del motor sea superior a los datos encontrados anteriormente. Luego se procede analizar el peso y costo del motor para la selección. En la tabla 9 se presenta la comparación de algunos motores comerciales que tienen características técnicas cercanas a las requeridas para este proyecto. Se puede observar que el motor HT3525 en cuanto a torque y potencia cumple con los requerimientos encontrados a partir de la ecuación 14 y la ecuación 15. Para la máxima eficiencia el motor puede dar un torque continuo superior comparado con los otros motores como se puede ver en las tablas en el Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4.

Datos del motor seleccionado G series				
Modelo del motor	SAW 4012	SAW 408	G25 Crystalyte	HT3525 Crystalyte
Tipo de motor	Brush-Less Direct Current	Brush-Less Direct Current	Brush-Less Direct Current	Brush-Less Direct Current
Rango de potencia	219,7 W	820,9 W	250-400 W	250-2000W
Rango de voltaje	36 V	48 V	24-48 V	24-72 V
Eficiencia	80.1 %	81,8 %	68,2 %	86%
Velocidad sin carga	131,7 R.P.M.	296,6 R.P.M.	277,1 R.P.M.	222,5 R.P.M.
Rango de torque	45,02 N.m	68 N.m	21,33 N.m	46,1 N.m
Corriente de línea	18,08 A	39,65 A	23,08 A	26,53 A
Pares de polos	22	20	20	23
Peso	5,4 Kg	5,4 Kg	3,8 Kg	6,5 Kg
Precio	412,4 Euros	412,4 Euros	310 Euros	345 Euros

Tabla 9 Datos de motores BLDC. [18]

El motor seleccionado se puede ver a continuación:



Figura 22 Motor BLDC HT3525 Crystalyte seleccionado. [18]

3.5.1 Curvas del motor seleccionado

Al observar el comportamiento del motor se puede decir que cumple con los requisitos necesarios para implementarse en el sistema de conversión de la bicicleta convencional a eléctrica. Las curvas que caracterizan al motor pueden observarse en las siguientes figuras suministradas por el fabricante del producto:

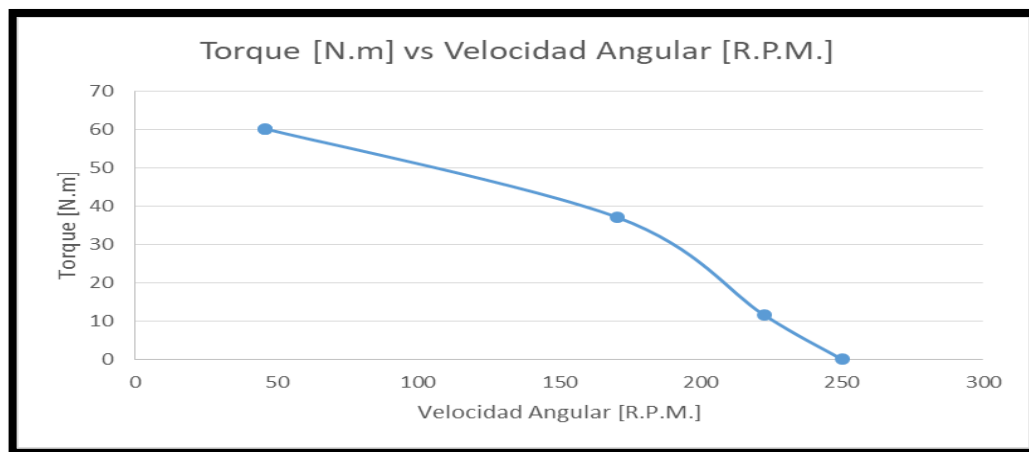


Figura 23 Curva torque [N.m] vs velocidad angular [R.P.M.]. [18]

La figura 23 muestra el comportamiento del motor seleccionado. El motor a la máxima eficiencia puede generar un torque de 11 N.m que es superior al torque encontrado en la sección 2.4.1.

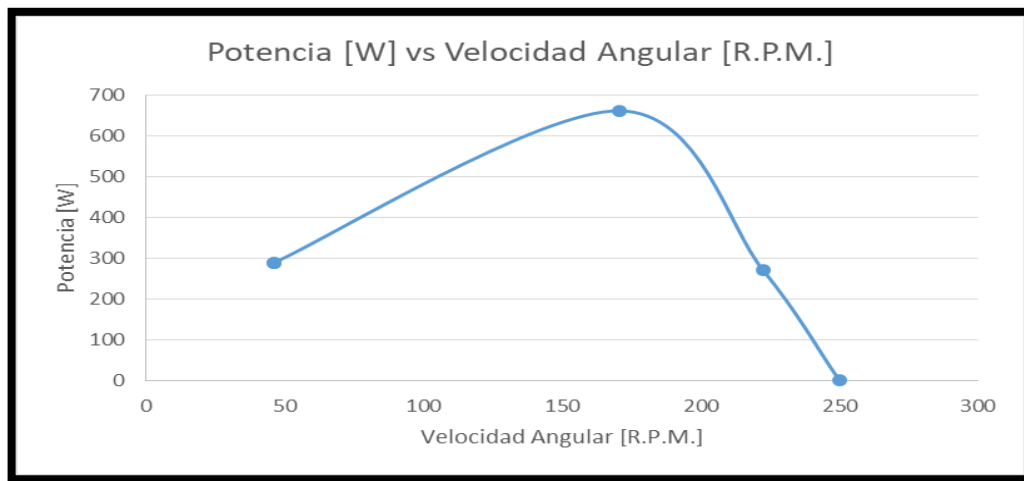


Figura 24 Curva potencia [W] vs velocidad angular [R.P.M.]. [18]

La figura 24 muestra el comportamiento en cuanto a potencia de salida del motor para cada velocidad. El motor genera un torque de 11 N.m a una velocidad de 222,5 R.P.M. generando una potencia de 270,4 W superior a la que se requiere. La potencia del motor estará limitada por la corriente que sea capaz de suministrar la batería que se seleccione.

4. SELECCIÓN DE LA BATERÍA Y CONTROLADOR ELECTRONICO

Las baterías son dispositivos portátiles que sirven para producir energía eléctrica a partir de una reacción química. Estas baterías son algunos de los residuos más contaminantes que se fabrican, debido a que requieren un tratamiento especial y una disposición final cuidadosa ya que son considerados residuos muy peligrosos.

4.1 Parámetros electroquímicos de la batería

Las prestaciones de una batería van a depender en gran medida de las características que tengan las celdas o elementos utilizados para su fabricación. Los parámetros electroquímicos más utilizados para caracterizar y seleccionar una batería son: Fuerza electromotriz o voltaje, capacidad específica, energía específica, ciclo de vida.

4.1.1 Fuerza electromotriz, voltaje o potencial [E]

El voltaje de una celda electroquímica viene dado por la diferencia entre los potenciales redox de los materiales activos del cátodo y del ánodo. Es muy importante disponer de celdas con alto potencial, ya que permiten disminuir el número de elementos que se deben conectar en serie para aumentar el voltaje nominal de la batería. La fuerza electromotriz de las celdas y las baterías se mide en volts.

4.1.2 Capacidad específica [Q]

La capacidad es el parámetro que indica la cantidad total de carga eléctrica que es capaz de almacenar la batería. La unidad comúnmente utilizada para expresar la capacidad es el ampere-hora [Ah].

4.1.3 Energía específica [W]

La energía específica indica la cantidad total de energía eléctrica que se puede almacenar en la batería. Este parámetro electroquímico es muy importante ya que reúne a los dos ítems anteriores. La unidad de medida es el [Wh/Kg].

4.1.4 Ciclos de vida

Los ciclos de vida de una batería son el número de ciclos carga/descarga que se pueden llevar a cabo hasta que la capacidad de la batería sea el 80% de su valor nominal. Es recomendable que las baterías tengan más de 500 ciclos de vida para que puedan usarse en vehículos eléctricos.

4.2 Clasificación de las baterías eléctricas

Las baterías eléctricas cumplen la función de alimentar al controlador para el funcionamiento del sistema. Existen diversos tipos de baterías que han ido evolucionando al pasar el tiempo.

4.2.1 Batería de plomo

Las baterías de ácido de plomo sellado (o SLA) fueron una vez las baterías predeterminadas para la mayoría de las motos eléctricas y de las bicicletas eléctricas. En la actualidad, la mayoría de las scooters siguen usando baterías SLA, mientras que para las bicicletas eléctricas (las cuales frecuentemente requieren de la participación humana) se ha optado por nuevas tecnologías para las baterías para hacer que la bicicleta sea lo más ligera posible. Esto se debe a que las baterías SLA son particularmente pesadas. A pesar de que son pesadas y voluminosas, mantienen una ventaja: son fáciles de encontrar y no son caras. Una batería SLA tiene una vida útil de en torno a 300-500 ciclos de carga, dependiendo del uso, tamaño, temperatura, calidad y muchos otros factores.

4.2.2 Batería de níquel

Las baterías híbridas de metal de níquel han estado presentes durante un tiempo. Son bastante más ligeras que las baterías SLA. Presentan muchas mejoras con respecto a las baterías de ácido de plomo sellado, sin embargo, el precio de la batería de níquel es mucho más elevado que la batería de plomo. Una batería NiMH tiene aproximadamente dos veces la vida útil de una de las baterías de plomo pero pesa aproximadamente un 30% menos. Las baterías NiMH necesitan ser cargadas una vez al mes si no se usan para mantener su capacidad total.

4.2.3 Batería de litio

Las baterías de ion de litio o (Li-Ion) son las que cuentan con la tecnología más novedosa. Una batería de litio tiene una vida útil de 2 a 3 veces la vida útil de una batería de plomo. Las baterías de litio son las más ligeras, con un peso medio de aproximadamente un 15% menos que las baterías NiMH y en torno a un 60% menos que las de plomo.

4.3 Cálculos para la selección de la batería

Para la selección de la batería se van a tener en cuenta los siguientes criterios: capacidad [Ah], energía específica [Wh/Kg], Peso [Kg], Costo [\$]. Para los cálculos es necesario conocer los parámetros nominales del motor seleccionado suministrados por el fabricante, que se pueden observar en la tabla 10. [19] [20]

Descripción	U	I	P1	T	N	P2	Eff
	[V]	[A]	[W]	[N.m]	[R.P.M.]	[W]	[%]
Sin Carga	35,94	0,918	33,00	0,04	250,0	1,04	3,1
Máxima Eficiencia	35,51	8,837	313,9	11,61	222,5	270,4	86,1
Máxima Potencia	34,87	25,41	886,5	37,04	170,7	661,9	74,6
Máximo Torque	34,87	26,53	925,3	60,16	46,1	290,3	31,3

Tabla 10 Parámetros nominales del motor BLDC. [18]

Para la selección de la batería es necesario saber el torque máximo que puede desarrollar el motor, lo cual determina la corriente máxima de operación que debe suministrar la batería. Los cálculos para la selección de la batería se realizarán cuando el motor trabaja a máxima eficiencia.

4.3.1 Consumo

Se determina teniendo en cuenta que el motor tiene que dar cierta potencia durante un intervalo de tiempo. Para este caso se considera una hora ya que las baterías están diseñadas para suministrar una determinada corriente durante una hora.

$$\text{Consumo} = P_M * n_M * \text{tiempo} \quad \text{E.C. 28}$$

Entonces a partir de los parámetros del motor el consumo durante una hora será:

$$\text{Consumo} = 270,4W * 0,861 * 1h = 232,814 Wh = 0,232814 KWh$$

4.3.2 Capacidad de la batería

La batería no debe descargarse por completo para poder funcionar correctamente, sin que se vea afectado su ciclo de trabajo por lo que se recomienda descargar la batería hasta un 80% de su capacidad de carga.

$$Q = \frac{\text{Consumo}}{V_{\text{Batería}} * (\% \text{ Descarga})} \quad \text{E.C. 29}$$

Entonces la capacidad de la batería es:

$$Q = \frac{232,814 Wh}{36 V * (0,8)} = 8,083 Ah$$

4.3.3 Energía específica

La energía específica másica se puede encontrar mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{V * Q}{\text{Peso de batería}} \left[\frac{Wh}{Kg} \right] \quad \text{E.C. 30}$$

Entonces para el cálculo de la energía específica másica se parte de un peso promedio de la batería de 5Kg:

$$W = \frac{36 V * 8,083 Ah}{5Kg} = 58,197 \frac{Wh}{Kg}$$

La energía específica másica es inversamente proporcional al peso de la batería. Por éste motivo entre menor sea el peso de la batería mucha más energía entregara la batería por kilogramo.

4.4 Criterios para la selección de la batería

Para la selección de la batería debe cumplirse ciertos puntos que se listan a continuación:

- La capacidad de la batería que seleccione debe ser superior a la calculada anteriormente.
- El peso y precio de la baterías, ya que este es uno de los puntos importantes en la conversión.
- La corriente máxima suministrada por la batería debe ser suficiente como para que el motor genere el par máximo que se presentó en el escenario de aceleración máxima.

4.5 Batería seleccionada

Para la selección de la batería se tienen en cuenta varias opciones comerciales, entre las que se encuentran las detalladas en el Anexo 5, Anexo 6. Las principales características de las baterías que se tienen en cuenta para la selección se muestran en la tabla 11:

Características de la batería seleccionada		
Modelo	Lithium Battery Pack DLP-01	B36LiM-DT
Peso	3,6 Kg	3,3 Kg
Dimensión [L*W*H]	375*90*83 mm	375*89*90 mm
Voltaje	36 V	36 V
Capacidad	11,6 Ah	14 Ah
Ciclos	800 ciclos	800 ciclos
Máxima corriente de descarga [A]	15-25 A	25 A
Máxima corriente de carga [A]	2-3 A	2A

Tabla 11 Comparación de baterías comerciales.

A partir de las características listadas en la tabla 11 la batería seleccionada es la batería Lithium Battery Pack DLP-01, ya que la capacidad de la batería cumple con los requerimientos calculados mediante la ecuación 29. La máxima corriente de descarga de 25 A es la suficiente como para producir el torque máximo que se necesita en el eje del motor.



Figura 25 Batería Seleccionada 36 V Lithium Battery Pack DLP-01. [21]

4.5.1 Capacidad de la batería seleccionada

La capacidad de la batería seleccionada es 11,6 Ah. Esta batería es capaz de suministrar 11,6 A durante una hora.

4.5.2 Energía específica de la batería seleccionada

$$W = \frac{36 \text{ V} * 11.6 \text{ Ah}}{3,6 \text{ Kg}} = 116 \frac{\text{Wh}}{\text{Kg}}$$

La energía de la batería es superior a la que se calculó mediante la ecuación 30. Entonces se puede decir que cumple con los requerimientos planteados anteriormente.

4.5.3 Tiempo de duración de la carga

Para el cálculo del tiempo de duración de la carga se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

$$t_o = \frac{Q}{I_o} \quad \text{E.C. 31}$$

Donde:

t_o : Tiempo de operación a corriente continua [h]

Q : Capacidad de la batería seleccionada [Ah]

I_o : Corriente de operación [A]

Para calcular el tiempo de duración de la carga se debe calcular la corriente de operación equivalente a la que va a funcionar el motor. Para satisfacer el ciclo de conducción mostrado en la figura 5.

$$I_o = \frac{T [N.m]}{K_T} \quad \text{E.C. 32}$$

Donde:

T = Torque equivalente que se requiere en el ciclo de conducción.

K_T = Constante del torque del motor la cual se determina mediante la siguiente curva.

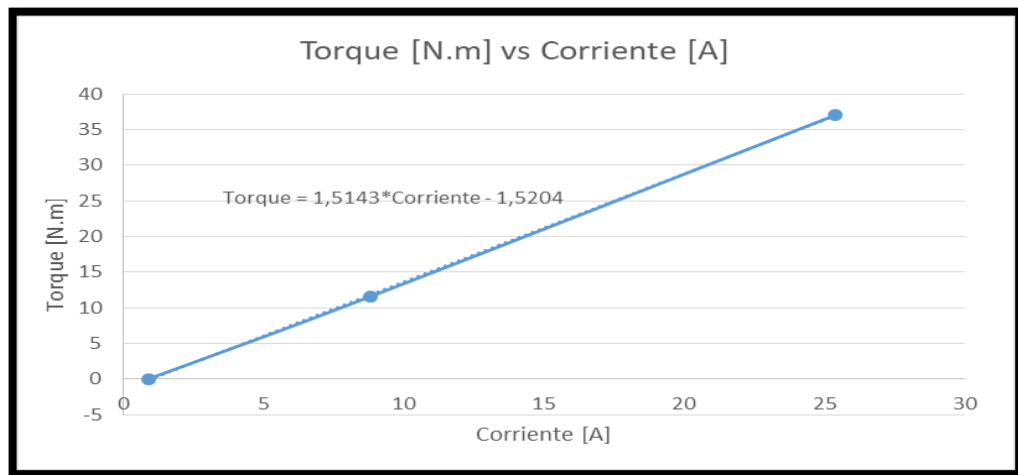


Figura 26 Curva Torque vs Corriente.

Entonces:

$$I_o = \frac{10,79 \text{ N.m}}{1,5143 \frac{\text{N.m}}{\text{A}}} = 7,125 \text{ A}$$

Entonces el tiempo de duración de la carga a la máxima velocidad será 25 Km/h:

$$t_o = \frac{11,6 \text{ Ah}}{7,125 \text{ A}} = 1,628 \text{ h}$$

4.5.4 Autonomía

Se refiere a la distancia que recorre la bicicleta a cierta velocidad. La autonomía a cierta velocidad se puede encontrar de la siguiente manera:

$$\text{Autonomía} = \frac{Q * \text{Velocidad}}{I_o} [\text{Km}] \quad \text{E.C. 33}$$

Entonces la autonomía será:

$$\text{Autonomía} = \frac{11,6 \text{ Ah} * 25 \frac{\text{Km}}{\text{h}}}{7,125 \text{ A}} = 40,701 \text{ Km}$$

La bicicleta es capaz de alcanzar una autonomía de 40,701 Km a una velocidad de 25 Km/h con una carga promedio de 115 Kg y con una asistencia máxima. Los resultados anteriores obtenidos anteriormente se refieren a la autonomía mínima de la batería. Debido a que no se tuvieron en cuenta otros factores que pueden aumentar o disminuir esta autonomía como, el pedaleo del ciclista, que no siempre se circula a la velocidad máxima, el terreno por el que se circula o la edad de la batería.

4.6 Selección del controlador electrónico del sistema batería-motor

El controlador es el centro de gestión del sistema eléctrico, es donde se procesa la energía de la batería y se ofrece potencia hacia los elementos activos como el motor, palanca de frenos, sensor de pedaleo, sensor de efecto hall. Toda señal procedente de los componentes externos se transmite al controlador y se incorpora al software interno del controlador con el que viene incorporado. El software regula la salida PWM de acuerdo con la señal externa de entrada procedente del sensor de pedaleo. El funcionamiento del software puede visualizarse en el siguiente diagrama de flujo:

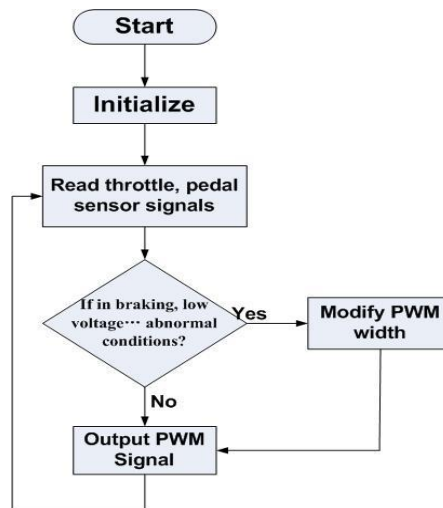


Figura 27 Proceso de trabajo del software. [22]

Para mantener el motor en funcionamiento es necesario que el campo magnético que se produce en las bobinas del rotor cambie de posición para que el campo magnético del rotor se mueva intentando alcanzar el campo producido por el estator. Por esta razón para la operación del motor siempre se debe saber la posición del rotor con respecto al estator para saber la conmutación de fases adecuada. Para obtener la posición del rotor se puede realizar mediante los dos métodos que se trataron en la sección 3.4.

4.6.1 Control de velocidad del motor BLDC

Para entender el control de velocidad del motor primero que todo se debe saber que la velocidad angular [R.P.M.] del motor está determinada por la constante del motor K_v [R.P.M./V]. La relación entre velocidad y voltaje es directamente proporcional como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad Angular [R.P.M.]} = K_v \left[\frac{\text{R.P.M.}}{\text{V}} \right] * \text{Volts [V]} \quad \text{E.C. 34}$$

Para el motor seleccionado la constante (K_v) está en el orden de 6,5 R.P.M. por cada volt aplicado al motor.

Mientras que el consumo de corriente del motor es directamente proporcional a la carga de torque en el eje del motor. Esta relación se puede notar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Torque motor [N.m]} = K_T \frac{\text{N.m}}{\text{A}} * I [\text{A}] \quad \text{E.C. 35}$$

Para el motor seleccionado la constante (K_T) está en el orden de 1,5143 N.m por cada Ampere aplicado al motor.

Con lo anterior se puede concluir que a mayor voltaje aplicado mayor velocidad y torque va a desarrollar el motor debido a la linealidad de las relaciones mostradas en la ecuación 34 y la ecuación 35. De aquí se puede observar que la velocidad puede ser controlada por tensión. Una forma sencilla de controlar el voltaje es empleando la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), con esta técnica se controla el voltaje promedio RMS en las fases del motor lo que permite que aumente o disminuya el ciclo de trabajo de la onda P.W.M. Para aplicar esta técnica se debe tener en cuenta la frecuencia PWM ya que estas señales de PWM serán las que controlen el encendido y apagado de los mosfets del inversor. Estos transistores presenta perdidas de conmutación y a altas frecuencias se incrementan. La frecuencia de conmutación está en el orden 15 KHz. En la siguiente figura se puede ver una representación en la siguiente figura de un PWM aplicado en una señal de 5 V.

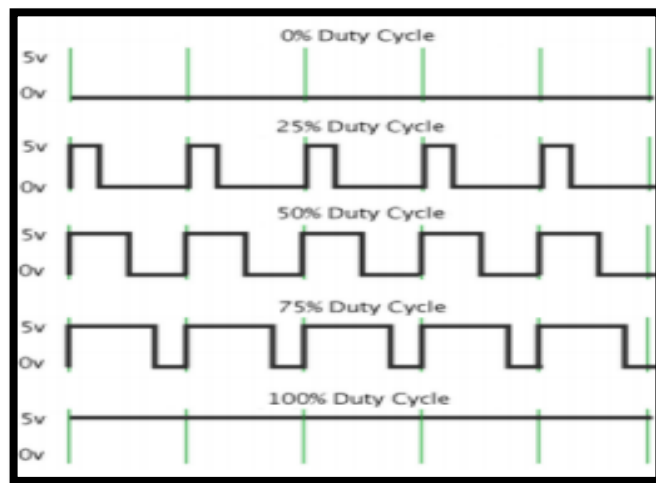


Figura 28 Modulación por ancho de pulsos. [23]

En la figura 28 se puede ver la modulación por ancho de pulsos. El ciclo de trabajo depende del esfuerzo del ciclista el cual es detectado por el sensor de velocidad. Cuando el esfuerzo del ciclista es máximo el ciclo de trabajo es de 100% como se puede ver en la última grafica de la figura anterior. Para el motor seleccionado para lograr la máxima velocidad el porcentaje de PWM debe ser el 100% en donde el voltaje será de 36 V aplicado a los devanados del motor. Para un 50% de PWM la tensión promedio será aproximadamente 18 V y la velocidad será la mitad de la anterior. El control de velocidad PWM realiza el traslado de la curva par-velocidad del motor como se puede ver en la siguiente figura:

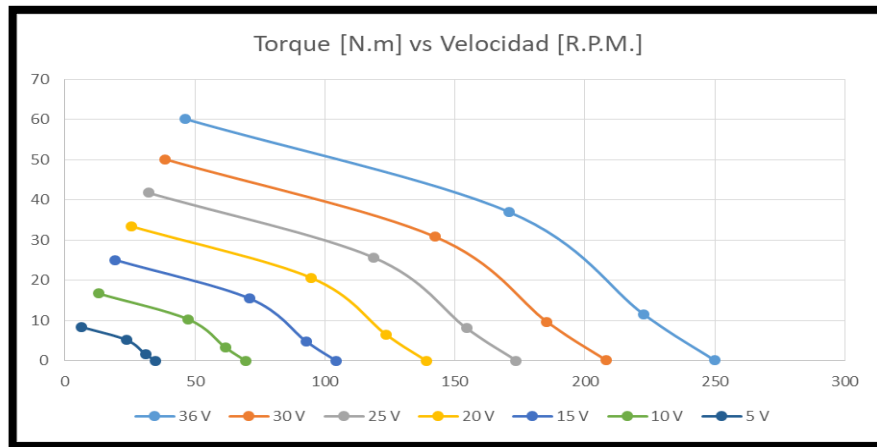


Figura 29 Curva Par-Velocidad del motor para diferentes tensiones promedio.

4.6.2 Criterios para la selección del controlador electrónico

Hoy en día, el controlador PWM (modulación por ancho de pulso) es típico en la mayoría de los vehículos eléctricos. Se enciende y se apaga a velocidades muy altas para controlar la rapidez con que desea ir. Los criterios para la selección del controlador son el precio y peso además de los parámetros siguientes: [19] [20]

- Tensión = 36 V

Debido al que la tensión de la batería y el motor (36 V). La tensión del controlador debe ser igual.

- Corriente = 25 A

El controlador debe estar en la capacidad de soportar la máxima corriente de descarga de la batería.

- Potencia = 383,60 W

La potencia del controlador debe ser igual o superior 383,60 W. Esta potencia se encontró a partir de los escenarios de operación en la sección 2.6.2.

4.6.3 Controlador electrónico seleccionado

Para seleccionar el controlador se procede a verificar que se cumplan todos los requerimientos anteriores. El controlador seleccionado fue el C4825-GR y sus características eléctricas se pueden observar en la siguiente figura. Anexo 7.

	C4820-GR	C4825-GR	C4835-GR	C7240-GR
Battery Current (+2% / - 10%)	20 A	25 A	35 A	40 A
Phase Current Limit (+/- 10%)	50 A	75 A	90 A	120 A
Nominal Battery Voltage	36V-52V	36V-52V	36V-52V	36V-72V
MOSFETs	6x AOT460		12x AOT460	
Max Regen Voltage (+/- 2%)	58 V	58 V	58 V	88 V
Low Voltage Cutoff (+/- 2%)	27 V	27 V	27 V	31 V
Control Chip	XCKJ3232C			
eRPM Limit Sensorless	~28,000			

Figura 30 Características eléctricas controlador electrónico. [24]

En la figura 29 se puede ver los diversos modelos de controladores en las columnas 2 a 4, mientras que en la primera columna se observan las características eléctricas de cada controlador. Respecto al controlador seleccionado, es capaz de operar a 25 A que es la máxima corriente de descarga de la batería. La tensión de operación puede ser de 36 V a 52 V. El controlador dejara de funcionar cuando la tensión sea 27 V. La máxima corriente admisible del controlador es de 75 A. El modelo del controlador seleccionado se puede ver a continuación:

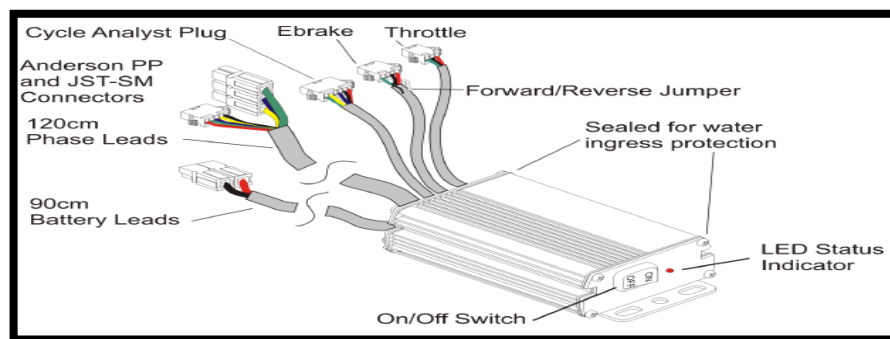


Figura 31 Características del controlador electrónico seleccionado. [24]

El controlador es el elemento más importante del sistema. Debido a esto debe seleccionar una protección para cuidar la inversión de dinero que se pueda realizar, La función de protección la hace un fusible. Este fusible debe operar en el momento que la corriente sea superior a la admitida por el controlador. El cálculo de corriente para la protección con fusibles se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$I_f = K * I_N$$

E.C. 36

Donde:

I_f = Corriente de protección de los fusibles.

K = Constante de protección la cual se toma en el rango de 1.8 a 2.1.

I_N = Corriente a plena carga, corriente máxima

La corriente máxima es el tope de corriente que puede suministrar la batería, pero con un tiempo de descarga mucho más rápido que a corriente nominal. Para la batería seleccionada la corriente máxima es de 25 A.

$$f = 1,8 * 25 A = 45 A$$

El fusible que se debe seleccionar es uno de 50 A. El fusible estándar cuchilla modelo EP-fuse-50 A es el siguiente:



Figura 32 Fusible EP-Fuse-50 A. [18]

El peso del elemento es de 0,02 Kg y tiene un precio de 3,19 Euros.

4.6.4 Complementos del sistema de pedaleo asistido PAS

Para que el sistema funcione adecuadamente el sistema debe tener incorporado un sensor de pedaleo que en este caso hará el papel de acelerador. El sensor trabaja a 5 volts e incorporan unos sensores tipo “hall” que detectan campo magnético. Al pasar un imán cerca del sensor, éste da una señal de salida de entre 0 y 4 voltios que el controlador interpreta para dar potencia al motor.



Figura 33 Sensor de pedaleo. [24]

El Peso del sensor de pedaleo es de 0,2 Kg y el precio del sensor de pedaleo es de 21 Euros.

Otro accesorio que se puede incluir es el sistema de frenado el cual reemplaza al freno regular. La función del sistema frenado es cortar la alimentación del controlador para apagar el sistema, y así brindar la seguridad necesaria al usuario. También se encarga de activar o desactivar el freno regenerativo en caso de poseerlo.



Figura 34 Maneta de frenos. [24]

El precio de los frenos es de 20 Euros.

Otro elemento complementario es el panel de control o analizador del sistema que da información del voltaje de la batería, la energía A-h y estadísticas de velocidad y distancia de la bicicleta.



Figura 35 Panel de control del sistema. [24]

El peso del analizador es de 0.5 Kg y el precio del Analizador es de 78 Euros.

4.6.5 Costo de conversión de bicicleta convencional a eléctrica

El costo de fabricación de una bicicleta convencional a eléctrica fue el siguiente:

Componente	Precio [Euro] IVA Incluido	Precio [Peso] IVA Incluido
Motor	345	1.208.011,98
Batería	229	801.840,8
Controlador	103	360.652,8
Sensor de Velocidad	21	73.531,2
Frenos	20	70.029,7
Panel de Control	78	273.116,7
Fusible	3,19	11.169,7
Precio Total	799,19	2.798.350,99

Tabla 12 Costo de conversión.

La revisión de precios se realizó el día 25 de febrero de 2018

4.6.6 Diagrama eléctrico del sistema.

En la figura 36 se presenta el diagrama del sistema de pedaleo asistido (PAS) propuesto con cada uno de sus elementos el cual se consideró en el capítulo 1. La batería se encarga de suministrar energía al controlador. El controlador se encarga de producir la señal alterna a partir de la batería para el funcionamiento del motor. El sensor de velocidad o par se encarga de producir una señal de voltaje de 0 a 4 volts proporcional a la cadencia o al esfuerzo del ciclista para posteriormente enviar dicha señal al controlador que se encarga de calcular el PWM para alimentar el motor. Los sensores de efecto hall en el estator detectan la posición del rotor y envían una señal al controlador para saber que fases se deben conmutar.

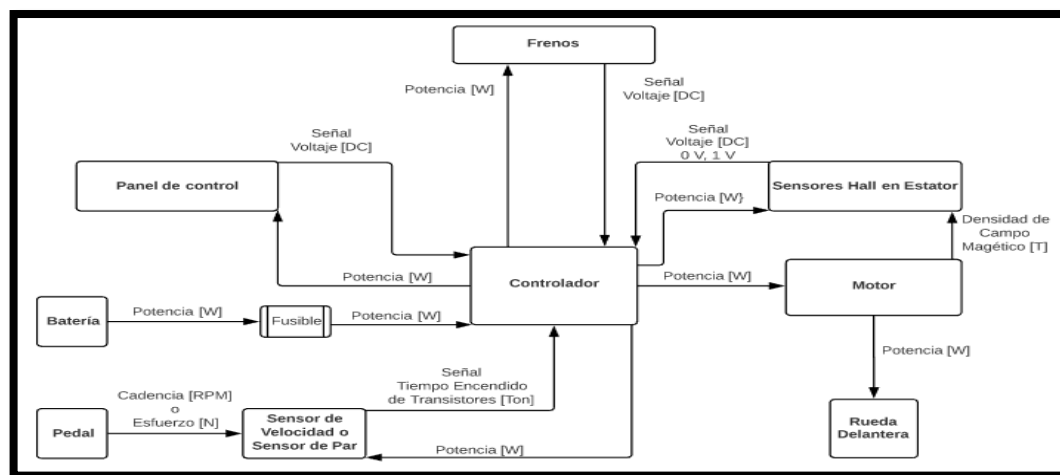


Figura 36 Diagrama del sistema propuesto PAS.

4.6.7 Validación del sistema en escenarios continuos.

El primer escenario que se va a tener en cuenta es el escenario de velocidad. El escenario de velocidad consiste en el cual la bicicleta se desplaza una velocidad determinada que no supera los 25 Km/h en un terreno plano que por lo general es el que más va a enfrentar el vehículo debido a las condiciones geográficas. Para cada velocidad se encuentra sus requerimientos en cuanto a torque, velocidad y potencia.

En este caso el peso total del sistema es:

$$M_{efec} = 100 \text{ Kg}$$

En donde se incluye los pesos reales de los elementos: Persona, batería, controlador, motor, fusible, analizador del sistema, bicicleta, sensor.

$$V = \left[0 \frac{\text{Km}}{\text{h}} - 25 \frac{\text{Km}}{\text{h}} \right] = \left[0 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$\theta = 0^\circ$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_{aceleracion}} = \frac{25 - 25}{t_{aceleracion}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Entonces los requerimientos de torque, velocidad y potencia son los siguientes:

Escenario de Velocidad			
Velocidad [m/s]	Torque [N.m]	Potencia [W]	Velocidad [R.P.M.]
0	3,82	0	0
1	3,87	12,89	31,83
2	4,01	26,71	63,66
3	4,24	42,37	95,49
4	4,56	60,8	127,32
5	4,98	82,92	159,15
6	5,48	109,65	190,99
7	6,08	141,92	222,82

Tabla 13 Requerimientos escenario de velocidad.

A partir de los anteriores datos se puede determinar la curva de carga del escenario de velocidad. Este escenario se puede observar a continuación:

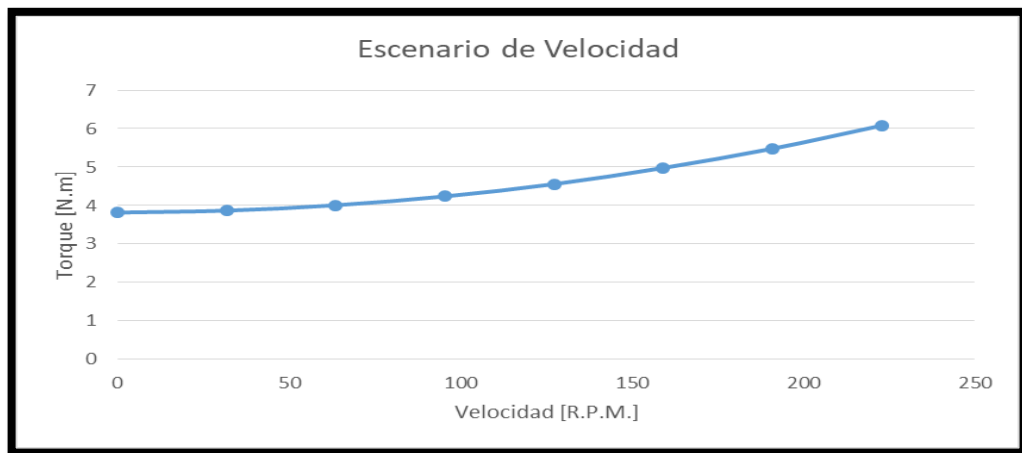


Figura 37 Escenario de Velocidad.

Al tener la curva de carga se puede determinar el punto de operación del sistema. El punto de operación del sistema se puede ver a continuación:

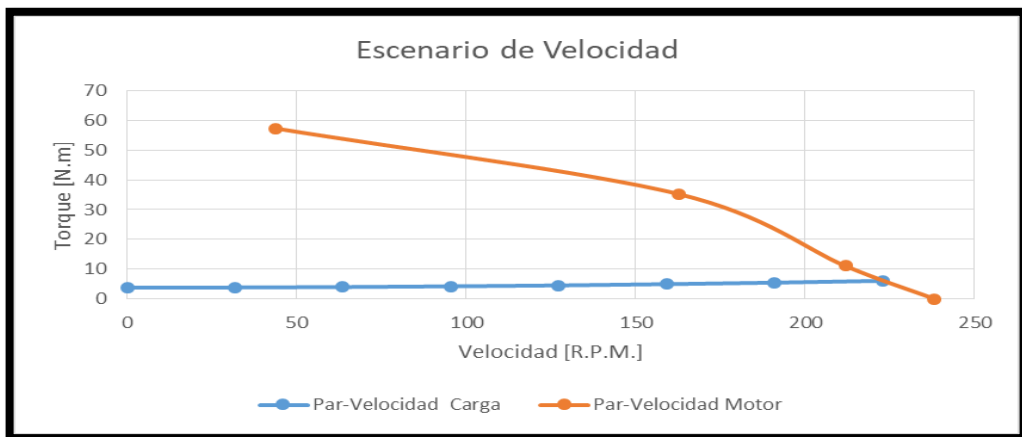


Figura 38 Punto de operación para máxima velocidad.

El punto de operación del sistema es el siguiente:

Punto Operación Velocidad 7 m/s	
Tensión [V]	35 V
Corriente [I]	4,97 A
Torque [N.m]	6,08 N.m
Velocidad [R.P.M.]	222,82 R.P.M.
Potencia [W]	141,92 W
Eficiencia [%]	79 %

Tabla 14 Datos punto de operación a velocidad máxima.

El segundo escenario que se va a tener en cuenta es el escenario de pendiente máxima. El escenario de pendiente máxima consiste en el cual la bicicleta transita

en un terreno inclinado a una velocidad promedio con la cual un ciclista común y corriente es capaz de alcanzar:

$$V_{max} = [0 \frac{m}{s} - 4 \frac{m}{s}]$$

Se considera una pendiente máxima de aproximadamente un 7%. Entonces la inclinación será:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\%}{100}\right) = \arctan\left(\frac{7}{100}\right) = 0,07 \text{ rad}$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_{aceleracion}} = \frac{15 - 15}{t_{aceleracion}} = 0 \frac{m}{s^2}$$

Entonces los requerimientos de torque, velocidad y potencia son los siguientes:

Escenario de Pendiente [7 %]			
Velocidad [m/s]	Torque [N.m]	Potencia [W]	Velocidad [R.P.M.]
0	24,38	0	0
1	24,42	81,41	31,83
2	24,56	163,74	63,66
3	24,79	247,91	95,49
4	25,11	334,85	127,32

Tabla 15 Requerimientos escenario de pendiente.

A partir de los anteriores datos se puede determinar la curva de carga del escenario de pendiente. Este escenario se puede observar a continuación:

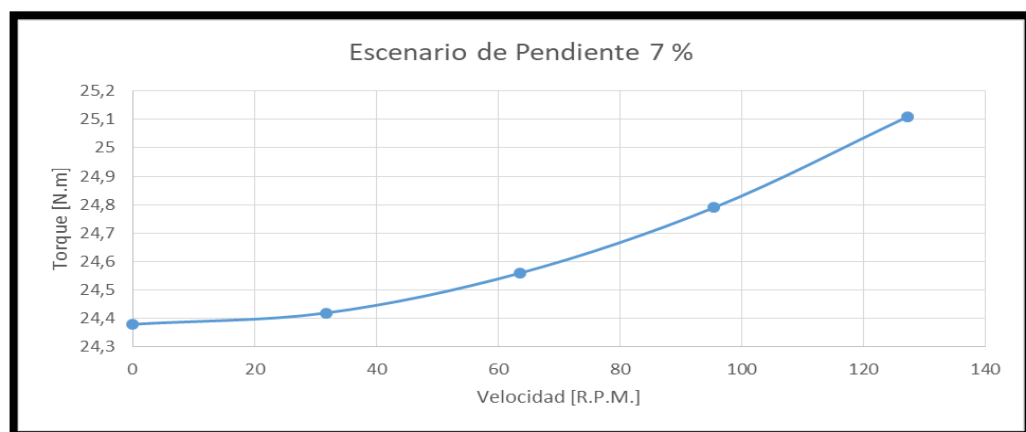


Figura 39 Escenario de pendiente.

Al tener la curva de carga se puede determinar el punto de operación del sistema como se realizó anteriormente. El punto de operación del sistema se puede ver a continuación:

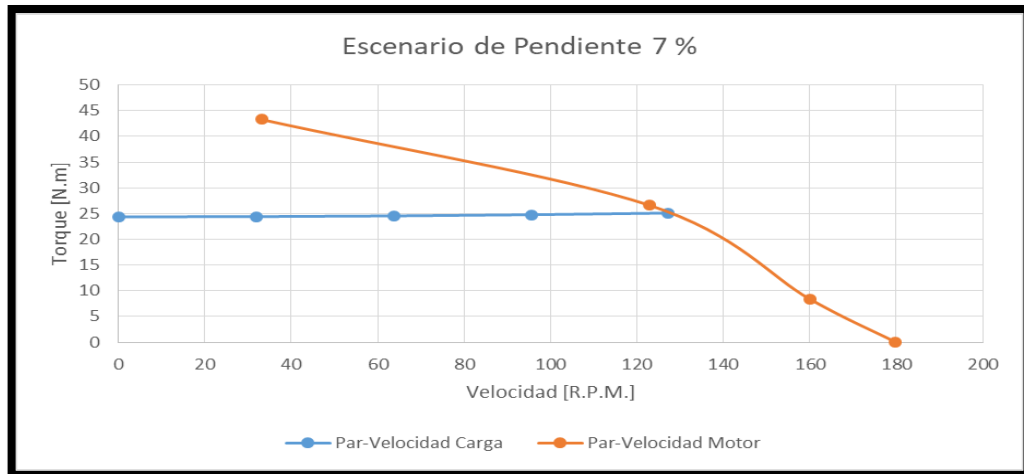


Figura 40 Punto de operación para pendiente a 4 m/s.

El punto de operación del sistema en una pendiente de 7 % a una velocidad de 4 m/s es el siguiente:

Punto Operación Pendiente 7 %- 4 m/s	
Tensión [V]	28 V
Corriente [I]	17,36 A
Torque [N.m]	25,11 N.m
Velocidad [R.P.M.]	127,32 R.P.M.
Potencia [W]	334,85 W
Eficiencia [%]	72,049 %

Tabla 16 Punto de operación para pendiente a 4 m/s.

5. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DISEÑADO

Para la validación del sistema se recurre a modelar el sistema en Matlab para comprobar que el motor con la ayuda de la batería pueda suministrar el torque y la potencia requerida durante el ciclo de conducción. En la simulación se excluyó el control de velocidad y la validación del sistema se realizará modificando manualmente la tensión que depende del nivel de asistencia o esfuerzo del usuario.

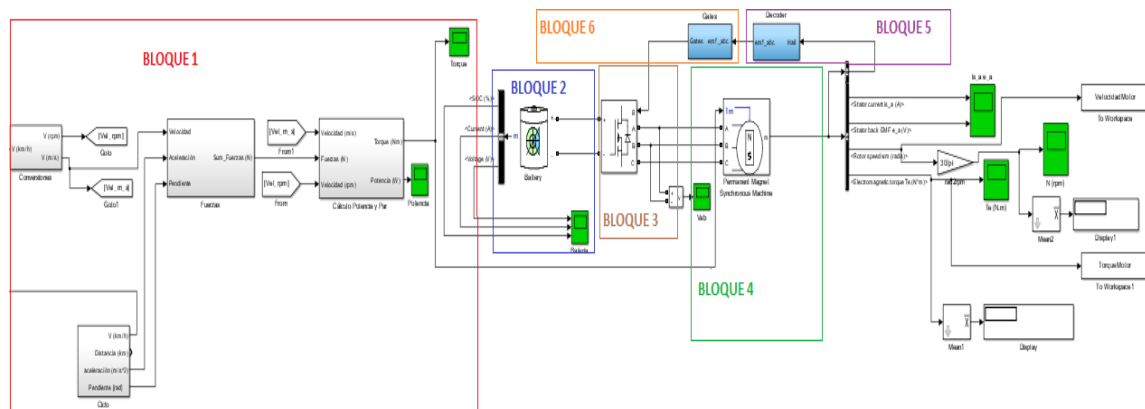


Figura 41 Diagrama del sistema en Matlab.

El sistema completo está compuesto por 6 grandes bloques que se detallarán a continuación:

El primer bloque consta de la dinámica vehicular de la bicicleta. A partir del ciclo de conducción que se trató anteriormente se introducen las ecuaciones 1,2,3,4,5,6,8,10,11,12,13 para obtener la curva del par de carga que se llevara a la entrada del motor. Este bloque se puede verificar a continuación:

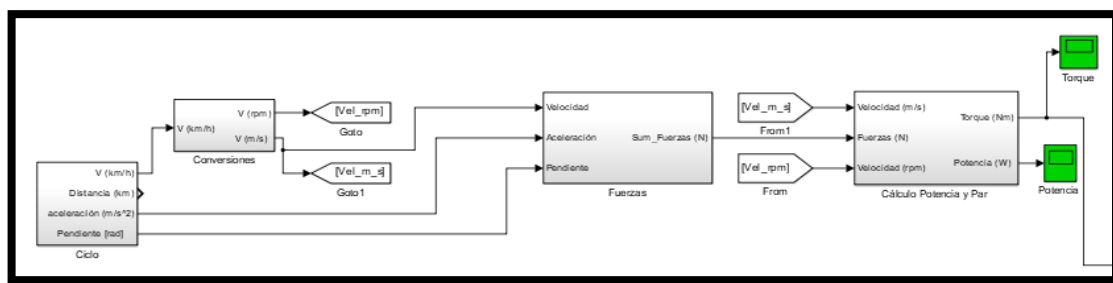


Figura 42 Bloque para obtener par de carga T_m .

EL segundo bloque es el modelo de la batería al cuál se le va a extraer la tensión, la corriente y el porcentaje de carga como se presenta a continuación:

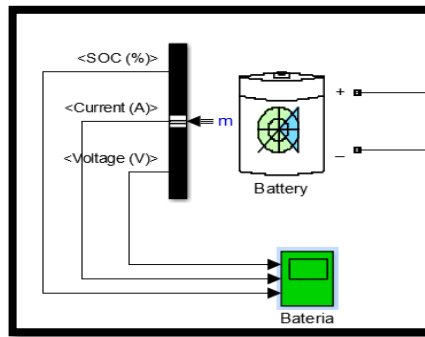


Figura 43 Modelo de la Batería seleccionada.

Luego de tener el modelo se realiza la configuración de los parámetros. La tensión de 36 V mostrado en la sección 4.5. El rango de capacidad de la batería de 25 Ah. y el tipo de batería a utilizar. Estos parámetros se pueden visualizar a continuación:

Figura 44 Parámetros de batería.

La curva de descarga característica para este tipo de baterías se puede ver en la siguiente figura:

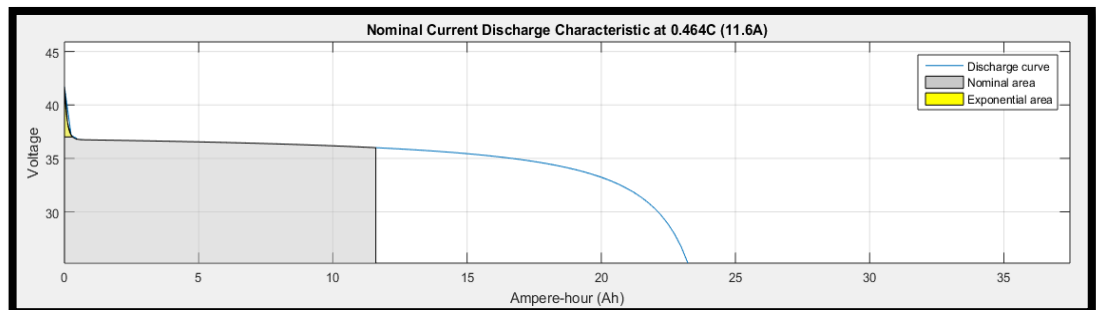


Figura 45 Curva de descarga de la batería a 11,6 A.

El tercer bloque es el modelo del inversor representado mediante el bloque Universal Bridge. Tiene como entradas la tensión de la batería y un vector de señales digitales de control que entra en el bloque a través de la entrada gate o compuerta a la cual llega la señal de impulsos procedentes del bloque Gates. Como salida tiene la tensión de las tres fases del motor. Este elemento se puede ver a continuación:

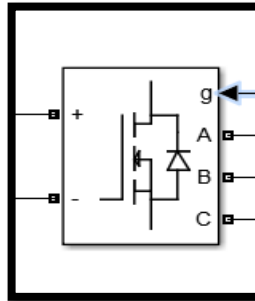


Figura 46 Bloque Universal Bridge.

La configuración de este elemento se realiza partiendo del número de fases y el tipo de dispositivo semiconductor que en este caso será el MOSFET modelo IRFB4110. La configuración se presenta a continuación:

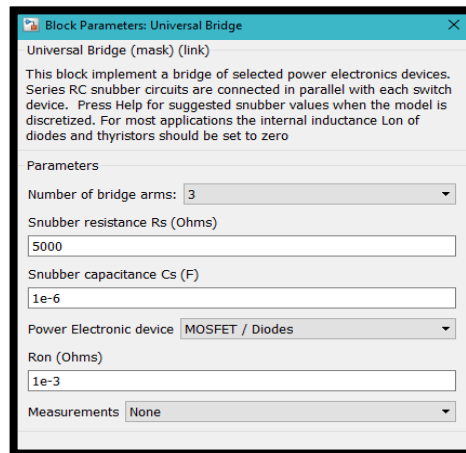


Figura 47 Parámetros del inversor.

El cuarto bloque es el motor BLDC que se modelará mediante el bloque Permanent Magnet Synchronous Machine. Tiene como entradas el par de carga y la señal de voltaje, y como salida el torque electromagnético del motor, la velocidad del motor, la señal de los sensores hall incorporados en el estator, la señal de corriente de las fases del estator y las señales de fuerza contra-electromotriz. El modelo del motor se puede ver en la siguiente figura:

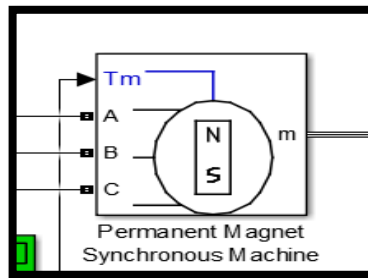


Figura 48 Modelo del motor BLDC.

Los parámetros a configurar del motor para un correcto funcionamiento es el tipo de motor, la resistencia de fase, inductancia de fase, constante de torque del motor, la inercia del motor y los pares de polos entre otros. Estos parámetros se observan a continuación:

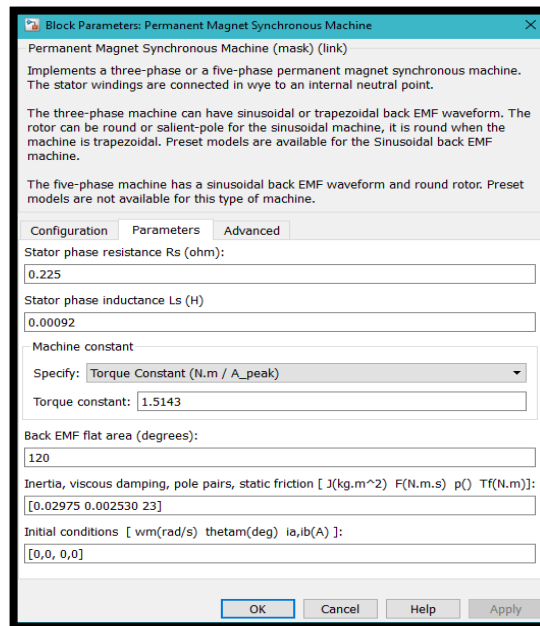


Figura 49 Parámetros del motor BLDC.

La resistencia de fase y los pares de polos del motor BLDC son suministrados por el fabricante comercial. La inductancia e inercia es tomada de un motor similar al seleccionado. La constante de torque del motor se calcula gráficamente como se puede ver en la figura 26. El funcionamiento del motor se realiza con la ayuda de sensores que detectan la posición del estator con respecto al rotor. Esta configuración se puede hacer realidad mediante los siguientes bloques:

- El quinto bloque es el Decoder tiene como entrada la señal de los sensores Hall denominados ha, hb y hc. Como salida tiene la señal que activan las fases del motor llamadas emf_a, emf_b y emf_c. Este elemento es el siguiente:

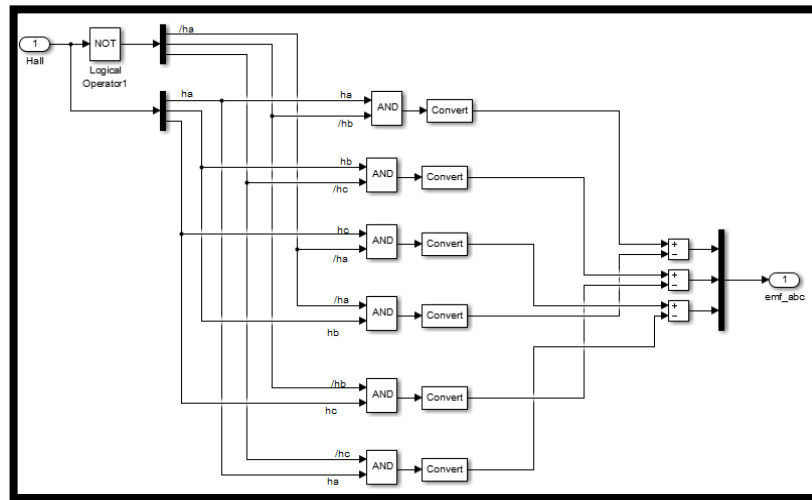


Figura 50 Bloque Decoder.

La función del bloque de la figura 50 es decodificar las señales de los sensores Hall mediante la lectura de campo magnético para obtener una señal de activación de las fases del motor. Cada una de las bobinas podrá estar alimentada con tensión positiva o negativa, o no estar alimentada, en función de la posición del imán del rotor, para que el motor gire correctamente. El funcionamiento del bloque se puede ver en la figura 51.

Tabla Lógica Decoder					
ha	hb	hc	emf_a	emf_b	emf_c
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

Figura 51 Tabla Lógica Decoder.

- El sexto bloque es el Gates tiene la función de utilizar la señal del bloque Decoder para saber que transistores en este caso Mosfets tiene que activar para cumplir con la secuencia de conmutación de las fases para que el motor opere correctamente. El bloque se puede ver a continuación:

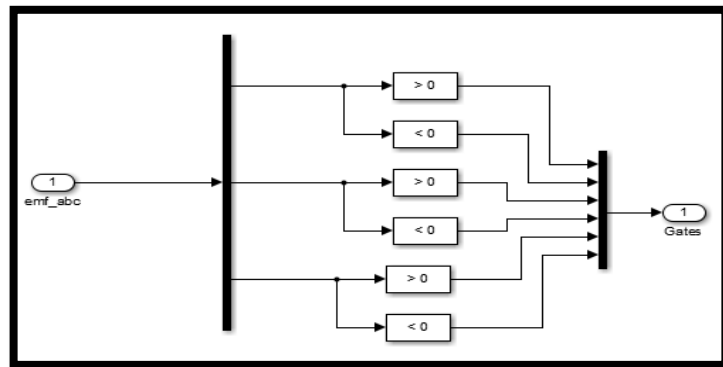


Figura 52 Bloque Gates.

La función del bloque Gates es poner en serie las fases del motor a partir de la señal decodificada de los sensores hall que miden campo magnético y partir de esa medida se obtiene una secuencia de conmutación. Q1, Q3 y Q5 representan los transistores superiores de las fases a, b y c respectivamente en el puente trifásico; mientras que Q2, Q4 y Q6 representan los transistores inferiores de las fases a, b y c en el puente trifásico. La conexión anterior se puede ver en la figura siguiente. Donde se muestra la conexión de las fases del motor al inversor:

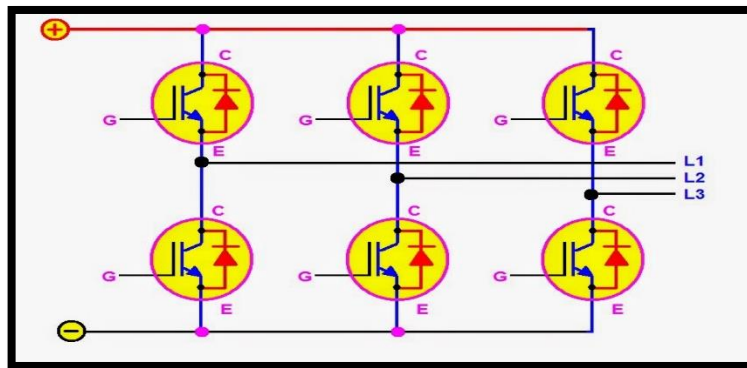


Figura 53 Conexión de MOSFETS.

En la figura 53 se muestra la conexión de los MOSFETS para conformar el inversor y la conexión de las fases del motor al inversor.

Tabla Lógica Gates									
emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0	
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0	
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0	
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1	
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0	
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 54 Tabla Lógica Gates.

5.1 Resultados de simulación

La validación del sistema se realiza cuando la asistencia requerida es máxima, para un voltaje en la batería de 36 V con un nivel de carga de 50% como se puede apreciar en la figura 44. Se recurre a utilizar la curva de torque en función del tiempo como curva de carga que se obtiene a partir del ciclo de conducción. También se presenta la operación del sistema con un torque fijo para ver el comportamiento del sistema más detalladamente.

5.1.1 Operación del sistema en el ciclo de conducción

Para observar el comportamiento del sistema se recurre a utilizar la curva de carga (Peso del sistema real) obtenida mediante el bloque 1 como se puede visualizar en el capítulo 5. Esta curva de carga se introduce al motor para ver su comportamiento.

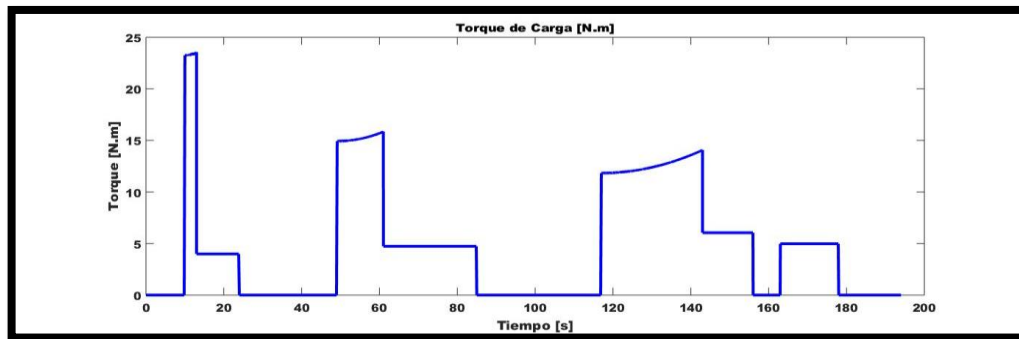


Figura 55 Curva de carga.

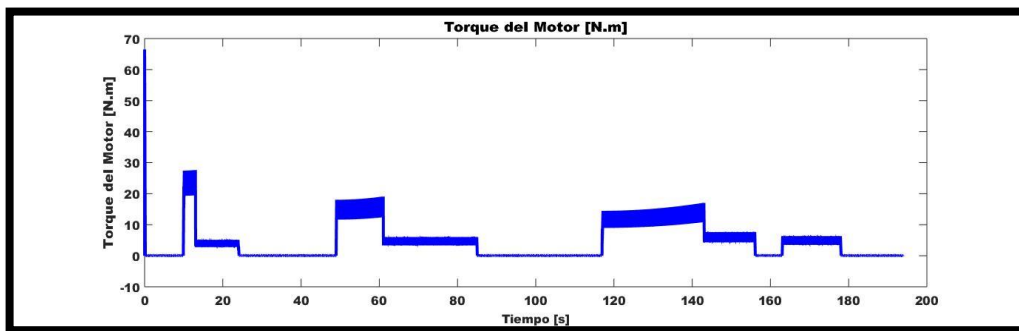


Figura 56 Torque desarrollado por el motor.

El torque desarrollado por el motor es un poco mayor en todo instante al torque de carga, pero sigue el mismo comportamiento de la carga. El máximo torque se presenta al inicio del ciclo debido a la corriente de arranque del motor como se puede ver en la figura 55.

El comportamiento de velocidad del sistema en el ciclo de conducción fue el siguiente:

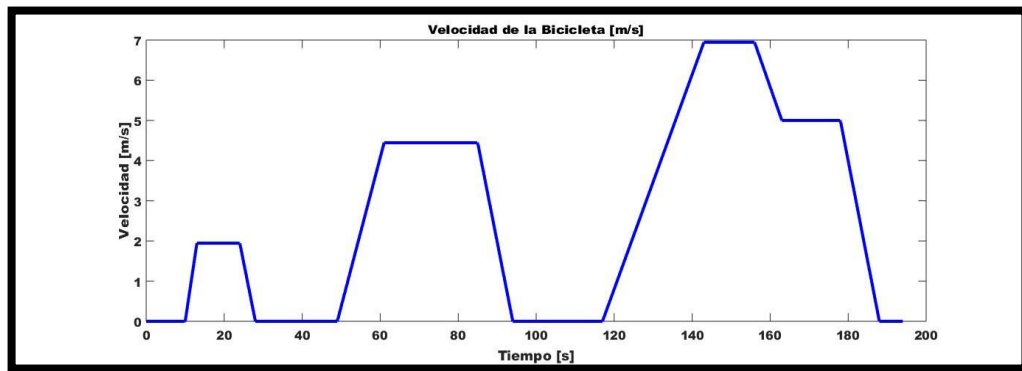


Figura 57 Velocidad de la bicicleta.

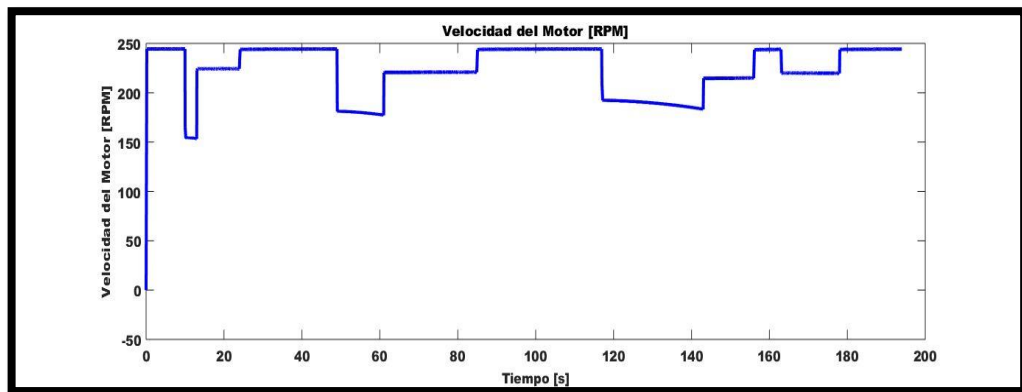


Figura 58 Velocidad desarrollada por el motor.

La velocidad del motor es directamente proporcional a la velocidad de la bicicleta. Se observa que en los trayectos de aceleración las torques presentados fueron los de mayor magnitud, y es donde el motor presenta las velocidades más bajas. Sin carga el motor presenta la velocidad de 244 RPM, es la velocidad más alta del ciclo de conducción. El comportamiento de corriente en el motor para desarrollar el torque requerido se puede ver a continuación:

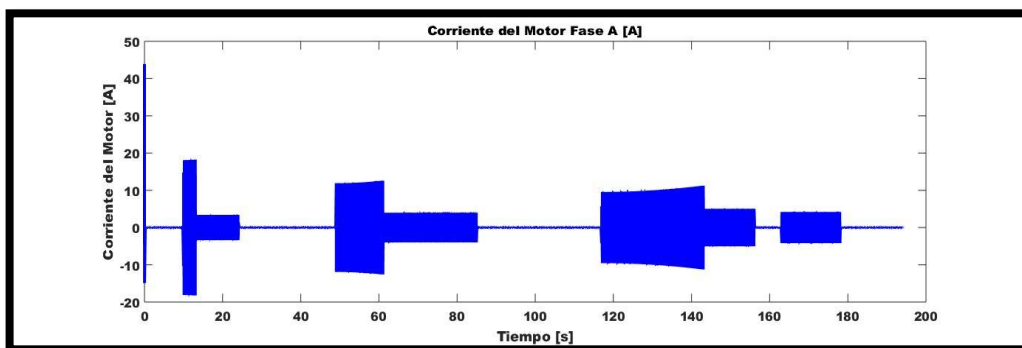


Figura 59 Corriente de la fase A del motor.

La mayor corriente que se presenta es en el arranque como se puede observar en la figura 59. Esta corriente es de 43 A, la cual es menor a la corriente encontrada mediante la ecuación 36, el fusible seleccionado fue de 50 A lo que permite un correcto funcionamiento al sistema soportando la corriente de arranque.

El comportamiento de la batería en el ciclo de conducción se puede ver mediante las curvas de voltaje, corriente y porcentaje de carga en función del tiempo como se ver a continuación:

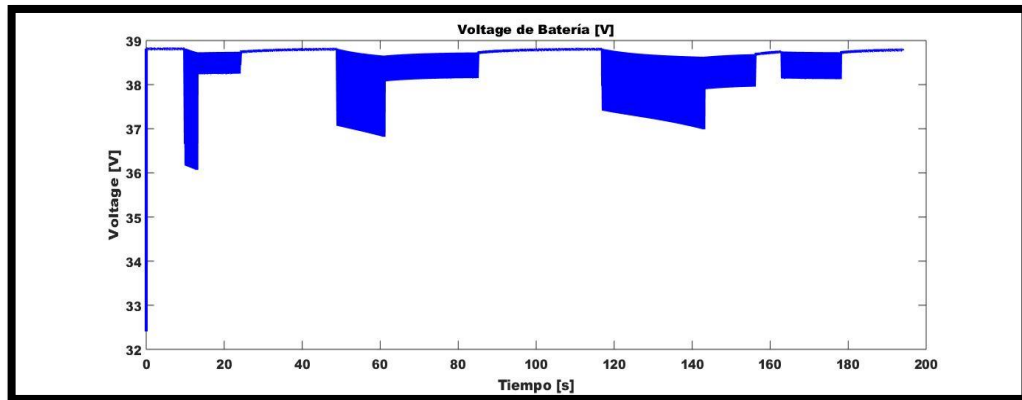


Figura 60 Voltaje de la Batería.

La tensión de la batería varía en función de la carga, presentando la mayor caída tensión en los trayectos de aceleración.

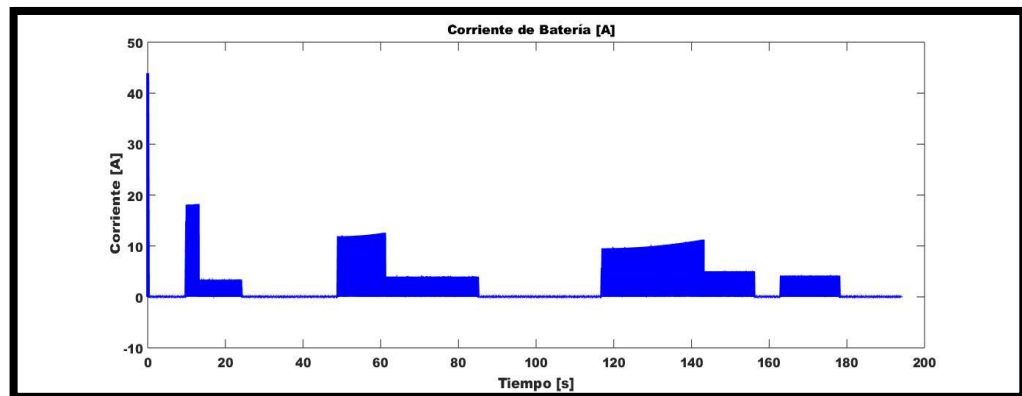


Figura 61 Corriente de la batería.

La corriente de la batería es similar a la de las fases del motor, la diferencia es que para la operación del motor se requiere una señal alterna como se puede ver en la figura 58.

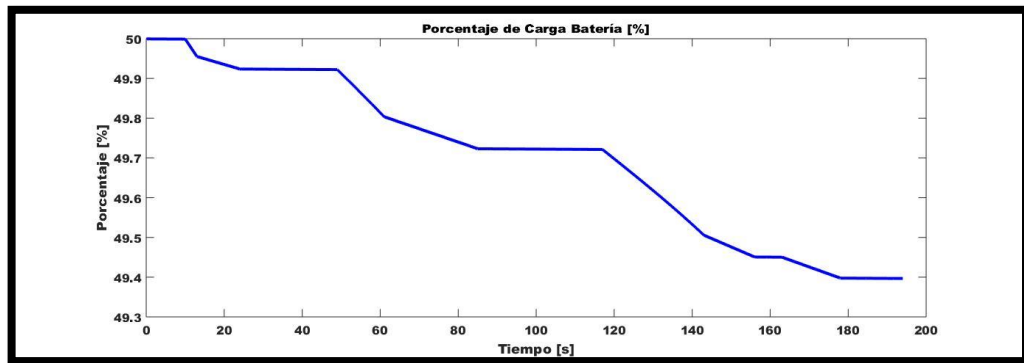


Figura 62 Porcentaje de carga de la batería

A partir de la curva anterior la descarga depende del torque de carga. La pendiente de descarga es proporcional a la corriente de operación del sistema. Para finalizar se presenta la tensión promedio del motor y la fuerza contra-electromotriz característica en este tipo de motores.

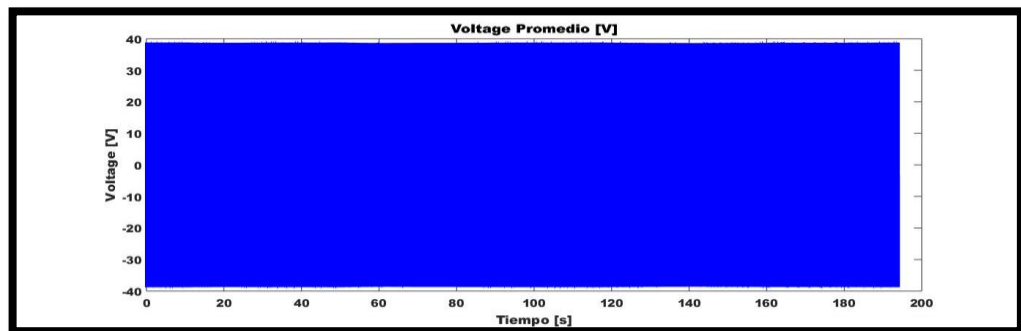


Figura 63 Voltaje alterno promedio.

La anterior curva se obtiene a la salida del inversor. Esta es la señal troceada con la que se alimenta el motor.

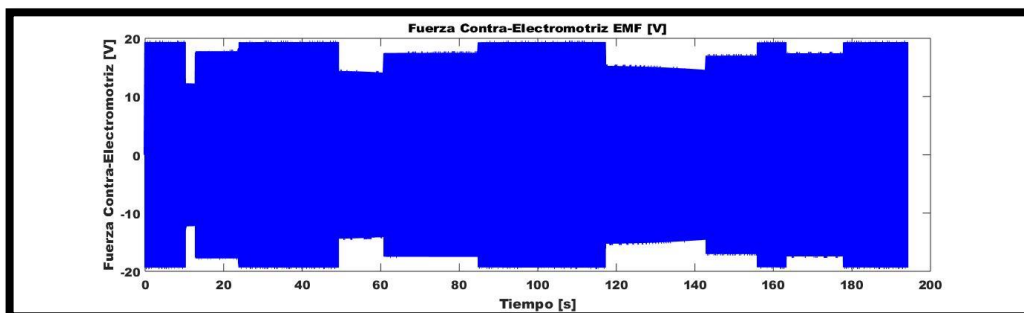


Figura 64 Fuerza Contra-Electromotriz.

La fuerza contra-electromotriz es directamente proporcional a la velocidad del motor. Por esta razón la magnitud más grande de fuerza contra-electromotriz se da cuando el motor no tiene carga, es decir en vacío.

5.1.2 Operación del sistema con un torque fijo

La operación del sistema con un torque fijo en el eje del motor, se realiza para visualizar el comportamiento de las formas de onda y así poder ver que el sistema esté funcionando correctamente. La simulación se realiza para el torque equivalente de 10.79 N.m encontrado mediante la ecuación 14. La curva de entrada de torque puede verse en la siguiente figura:

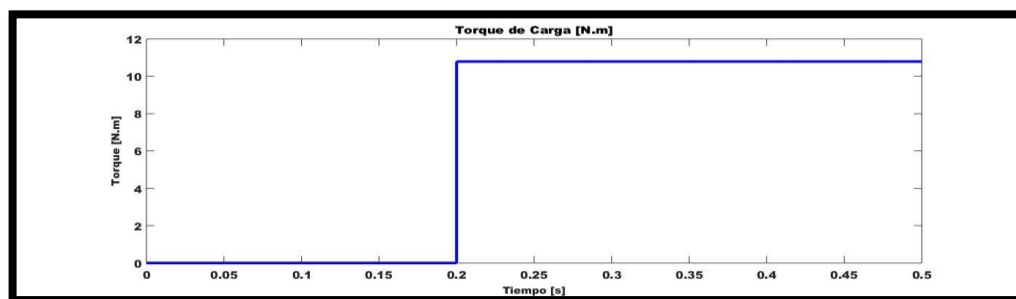


Figura 65 Torque de carga.

El torque de 10.79 N.m entra al eje del motor en el instante de tiempo de 0.2 segundos. El comportamiento del motor para desarrollar el torque requerido se puede ver en las siguientes figuras:

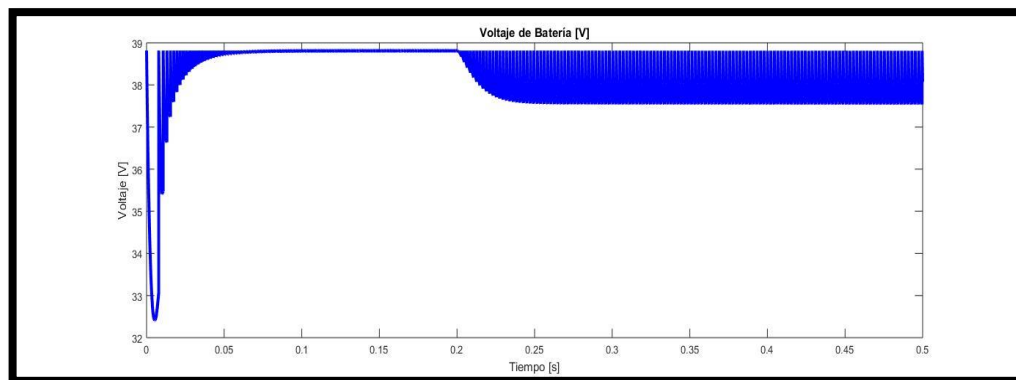


Figura 66 Voltaje de Batería.

La figura 67 muestra la corriente de la batería que llega al inversor.

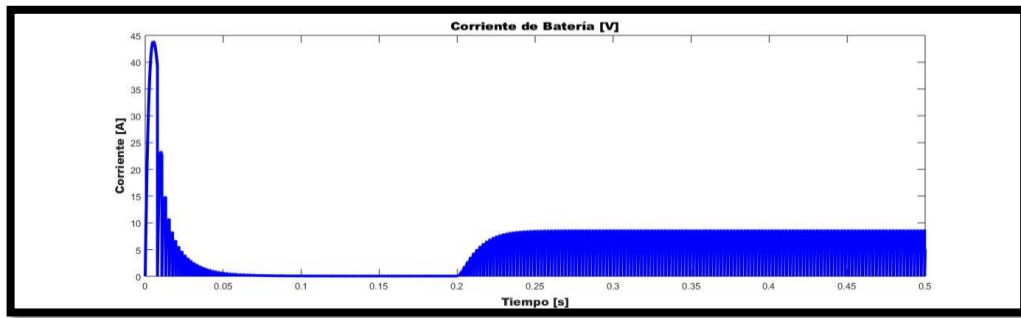


Figura 67 Corriente de Batería.

El nivel de corriente de la batería para desarrollar el torque de 10.79 N.m es muy cercano al calculado en la ecuación 32. Esta corriente se observa en la figura 67 y en la figura 69.

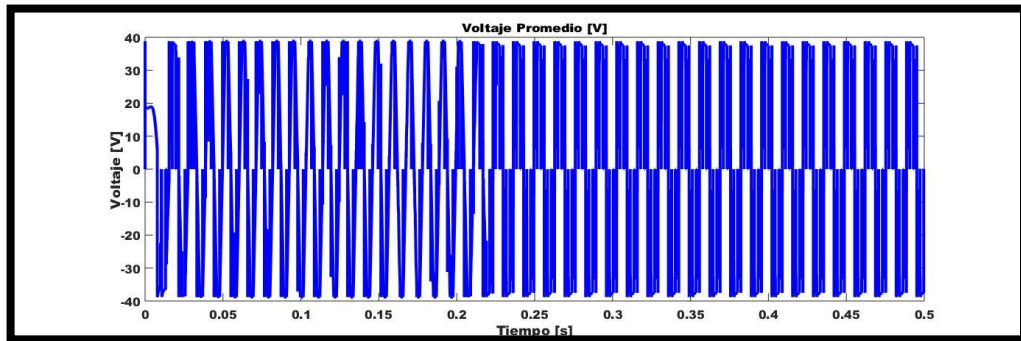


Figura 68 Voltaje Promedio.

La figura 68 muestra la señal alterna que llega a las fases del motor para su funcionamiento.

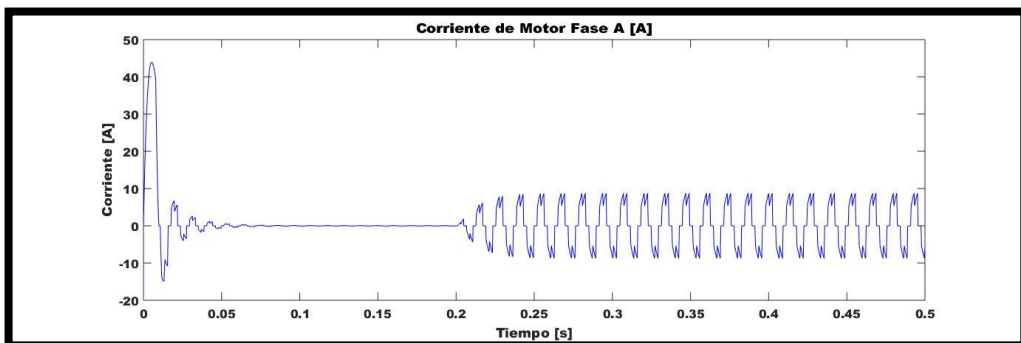


Figura 69 Corriente de Motor en Fase A.

En la figura 69 se observa la corriente de arranque del motor. Luego la corriente disminuye hasta llegar a cero. En 0.2 segundos entra la carga al sistema incrementando la corriente para producir el torque requerido en el eje del motor.

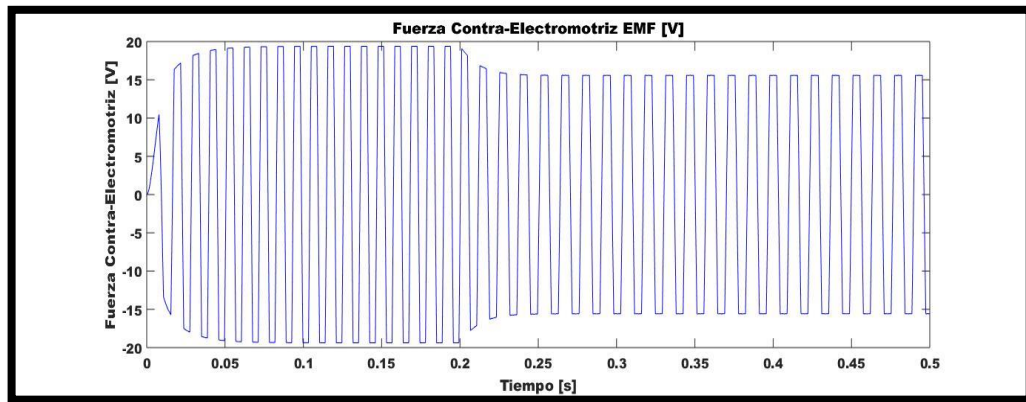


Figura 70 Fuerza Contra-Electromotriz EMF.

La figura 70 muestra la fuerza contra-electromotriz trapezoidal característica en este tipo de motores. La magnitud depende de la velocidad del motor.

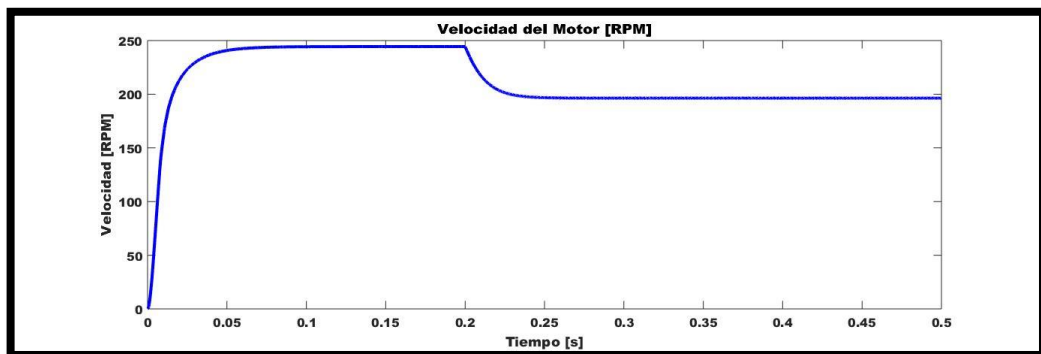


Figura 71 Velocidad del Motor.

La figura 71 muestra la velocidad de operación del motor cuando en el eje se tiene que desarrollar un torque de 10.79 N.m.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha propuesto un sistema de pedaleo asistido PAS para una bicicleta eléctrica. El sistema PAS propuesto para la conversión proporciona energía solamente cuando se pedalea, brindando una mayor autonomía a diferencia de los otros sistemas para la conversión. El sistema PAS permite conservar las características y beneficios de la bicicleta a pesar de estar equipada con componentes eléctricos.

Para la selección del motor eléctrico se recurre al método de par equivalente y potencia equivalente para un ciclo determinado. A partir del ciclo de conducción y con los escenarios planteados se encontró un bosquejo de los requerimientos en cuanto a torque-potencia que se necesita para la selección de un motor para este tipo de vehículos. El motor seleccionado es capaz de funcionar en diferentes trayectos sin exceder los límites del motor y batería planteados por los fabricantes comerciales de los componentes.

Inicialmente el motor que se planteó utilizar fue el motor de inducción, debido a las grandes ventajas tales como: eficiencia, peso entre otras. Este tipo de motores fue imposible de encontrar para este tipo de aplicaciones, por lo que se recurrió al uso del motor síncrono denominado BLDC, debido a que la alimentación de los devanados se hace mediante una fuente DC con ayuda de un inversor. Cabe resaltar que los motores DC sin escobillas no se han inventado.

La batería para el motor se seleccionó en el punto de potencia, torque, velocidad a máxima eficiencia. Esto es debido a que para cada escenario propuesto se tenía una potencia determinada, por lo que hubiera tenido que encontrarse varias capacidades de baterías. La batería seleccionada es capaz de suministrar la corriente necesaria para generar un torque en la rueda lo suficientemente grande para vencer las fuerzas externas.

El motor eléctrico no trabaja a la máxima eficiencia ya que el torque equivalente queda un poco alejado del nominal del motor. Pero esto se podría solucionar usando una relación de transmisión para llevar los requerimientos de la carga al punto de trabajo nominal del motor.

Para la validación del sistema eléctrico con exactitud mediante simulación se deben tener todos los parámetros de todos los componentes, algunos parámetros no son suministrados por los fabricantes comerciales y fue necesaria deducirlos a partir de otros elementos similares, sin embargo la validación del sistema eléctrico permitió verificar que se cumple con los requerimientos operativos en los diferentes escenarios.

El precio de la conversión de la bicicleta convencional a eléctrica es elevado, debido a que los componentes fueron buscados en fabricantes confiables que suministraban los datos y curvas necesarias para dicha conversión. En la red se pueden encontrar componentes a bajo precio pero con poca información. Además el costo del IVA de cada elemento era demasiado alto al adquirirlo en el exterior, ya que no se encuentran estos elementos en Colombia.

6.2 Trabajos futuros

Adquirir los componentes planteados en el proyecto para realizar la conversión de la bicicleta convencional a eléctrica y determinar los parámetros necesarios para realizar la simulación de manera precisa mediante el software Matlab.

Diseñar un motor de inducción para bicicletas que permitan mejorar la eficiencia y prestaciones de trabajo de dicho motor. Este tipo de motores no se encuentran disponibles en el mercado en la actualidad y sería una competencia notable para el tipo de motor seleccionado.

Diseñar el sistema eléctrico para la conversión teniendo en cuenta el frenado regenerativo. Utilizar condensador que permita almacenar la energía eléctrica producida mediante el frenado. Esta energía se podría utilizar en el momento de arranque que es donde se da el mayor consumo de corriente se presenta.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Segura, «Transporte y cambio climático,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/article20911.html>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [2] Valvermont, «Medio Ambiente y Naturaleza,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://medioambienteynaturaleza.com/consideraciones-y-tipos-de-bicicletas-electricas/>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [3] «Bicicletas Eléctricas,» [En línea]. Available: <http://vehiculoselectricos.nichese.com/tipostrasmision.html>. [Último acceso: 12 SEPTIEMBRE 2017].
- [4] «Bicicletas Eléctricas Wordpress,» 28 MARZO 2016. [En línea]. Available: <https://bicicletaselectricas.wordpress.com/2016/03/28/componentes-de-una-bicicleta-electrica/>. [Último acceso: 23 ENERO 2018].
- [5] «Bikelec,» Bikelec, 05 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.bikelec.es/blog/acelerador-o-asistencia-al-pedaleo/>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [6] Minitransporte, «Resolución,» 2 FEBRERO 2017. [En línea]. Available: <http://ccs.org.co/salaprensa/images/Documentos/MINTRANSPORTE/0000160%20-%202017%201.pdf>. [Último acceso: 5 Septiembre 2017].
- [7] D. S. P. C. B. y J. D. , «Electric Bicycle Using Batteries and Supercapacitors,» Lisboa, 2008.
- [8] J. Lin, N. Schofield y A. Emadi, «External-Rotor 6–10 Switched Reluctance Motor,» 2015.
- [9] D. R. Ojeda Pereira y L. F. Ortiz Pineda, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE BATERIA RECARGABLE PARA UNA BICICLETA ELECTRICA TIPO TRIKE MEDIANTE EL USO DE BATERIAS RECICLADAS DE ION DE LITIO 18650*, CUENCA, 2017.
- [10] J. X. Aguado, «La fuerza de Resitencia,» 22 Nvoviembre 2016. [En línea]. Available: <https://previa.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apuntos/08.pdf>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [11] J. L. R. Mera, *Estudio de conversión para un automovil con motor de combustión a automóvil con motor eléctrico*, SANTIAGO DE CALI, 2017.
- [12] M. Chilikin, Accionamientos Eléctricos, Mir Moscú.
- [13] «Guia de Especificación de Motores Eléctricos,» [En línea]. Available: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>.
- [14] P. P. Marín Rodrigo, *Aplicación software para la simulación del funionamiento energético de vehículos eléctricos*, Madrid, 2013.

- [15] «Comparative Study of Using Different Electric,» Tehran, 2008.
- [16] *Programación de Arduino mediante MATLAB/Simulink. Aplicación al control de velocidad de motores BLDC*, Valladolid, 2016.
- [17] L. C. Sánchez, *Sistemas electromecánicos*, 2016.
- [18] «Crystalyte,» [En línea]. Available: <http://www.crystalyte.com/>. [Último acceso: 23 01 2018].
- [19] D. R. Ojeda Pineda y L. F. Ortiz Pineda, *Diseño y construcción de un prototipo de batería recargable para una bicicleta eléctrica tipo trike mediante el uso de baterías recicladas de ion litio 18650*, Cuenca, 2017.
- [20] W. Vargas, W. Bonilla y F. Salazar, *Diseño y construcción del sistema de propulsión de un triciclo monoplaza eléctrico para personas con discapacidad en sus extremidades inferiores*, 2015.
- [21] «Golden Motor,» [En línea]. Available: <https://www.goldenmotor.com/>. [Último acceso: 10 Enero 2018].
- [22] «Onda Bike,» [En línea]. Available: <http://www.ondabike.es/news/46-funcionamiento-del-controlador-de-una-bicicleta-electrica-o-ebike.aspx>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [23] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://playground.arduino.cc/ArduinoNotebookTraduccion/Appendix3>. [Último acceso: 31 Enero 2018].
- [24] «Grin Technologies,» [En línea]. Available: <http://www.ebikes.ca/>. [Último acceso: 5 Octubre 2017].
- [25] «Acer forestales,» [En línea]. Available: http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/animacion_es_files/bateria.html. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [26] C.-I. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*, Tianjin: Wiley, 2012.

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1

La prueba del motor SAW4012 a 36V suministrada por la empresa fabricante del motor fue el siguiente:

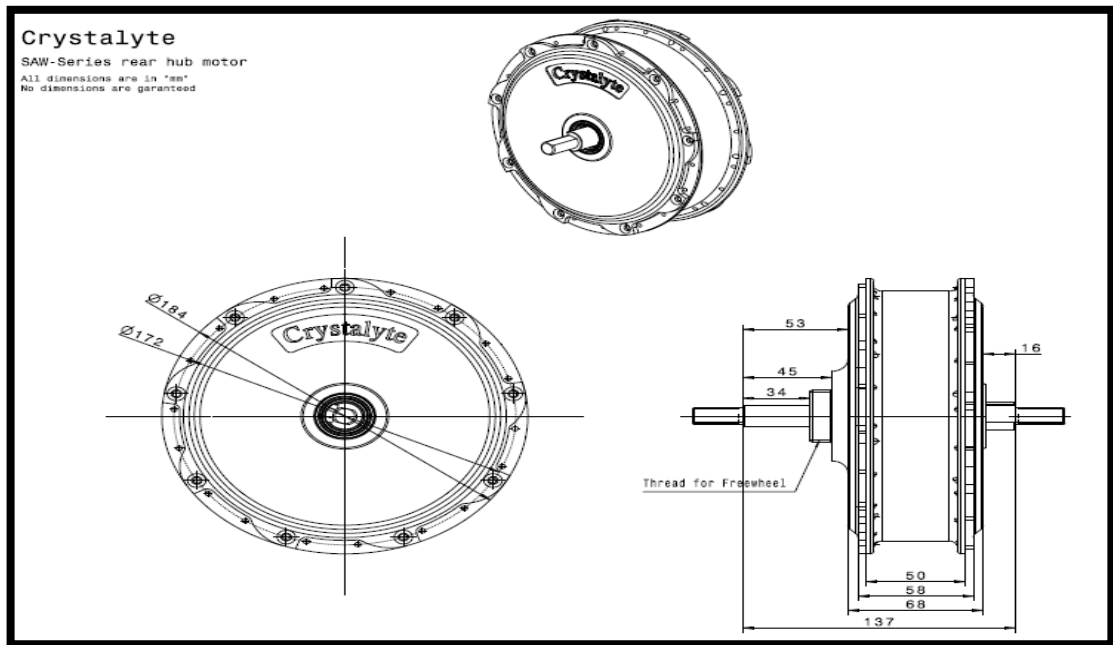
Crystalyte							
SAW4012 Motor 36V 25A TEST							
Descripton	U (V)	I (A)	P1 (W)	M (N.m)	N (rpm)	P2 (W)	EFF (%)
NO-LOAD	36.19	0.287	10.40	0.00	131.7	0.00	0.0
MAX-EFF	36.11	2.416	87.29	5.66	118.0	69.92	80.1
MAX-POUT	35.76	11.52	412.0	29.82	70.4	219.7	53.3
MAX-TORQUE	35.51	18.08	642.3	45.02	34.0	160.2	24.9
END	35.51	18.08	642.3	45.02	34.0	160.2	24.9

Fuente: [18]

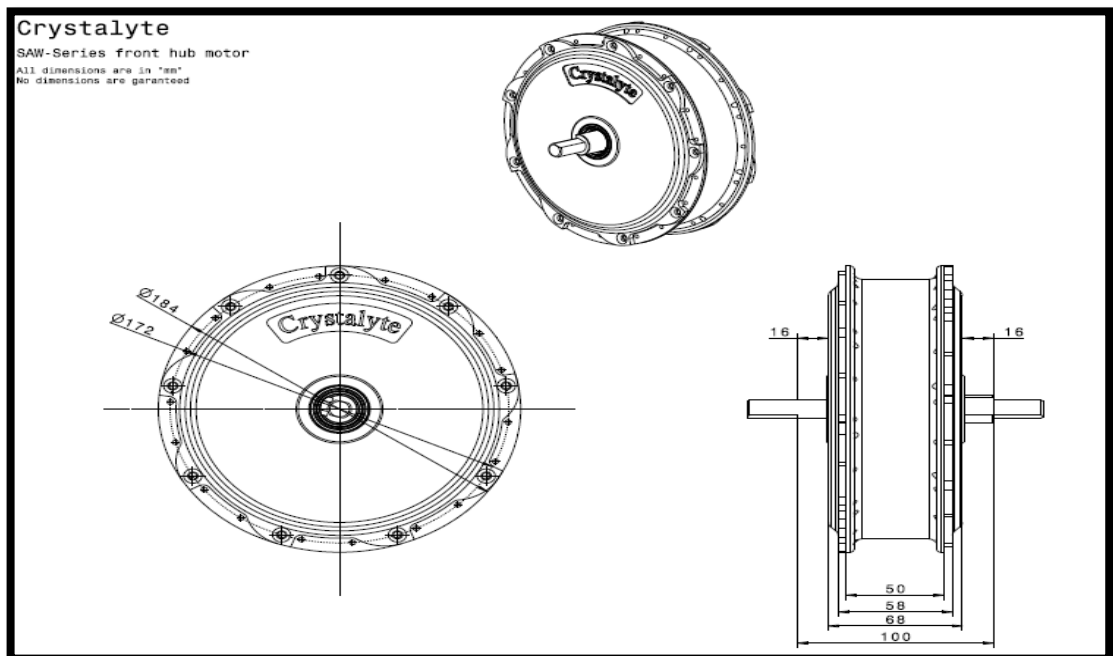
De los datos suministrados por el fabricante:

Constante de torque [N.m/A]	2,9
Numero de pares de polos	20
Resistencia por fase [Ω]	0,26
Rueda [Pulgada]	16'' - 28''
Rango de voltaje [V]	36 V – 48 V

Las dimensiones del motor para rueda delantera y para rueda trasera que se debe tener en cuenta en el momento de la instalación es el siguiente:



Fuente: [18]

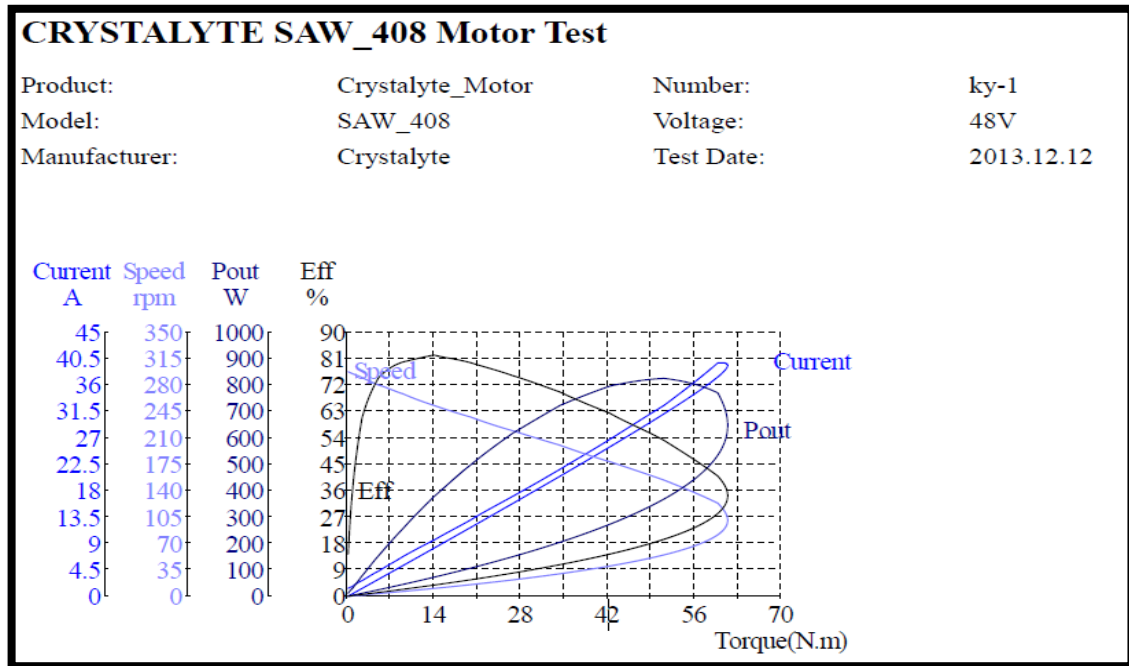


Fuente: [18]

El peso del motor SAW 4012 es de 5,4 Kg y el precio del motor es de 412,4 euros.

8.2 ANEXO 2

La prueba del motor SAW408 a 48V suministrada por la empresa fabricante del motor fue el siguiente:



Fuente: [18]

De la figura anterior se obtienen los resultados generales que caracterizan a éste tipo de motores:

State	Voltage	Current	Pin	Torque	Speed	Pout	Eff	Time
	V	A	W	N.m	rpm	W	%	S
No_Load	48.58	1.188	57.73	0.3	296.6	8.198	14.2	0.000
Eff_max	48.33	9.450	456.7	14.2	252.2	373.7	81.8	46.00
Pout_max	47.90	32.47	1555	51.2	153.2	820.9	52.8	91.00
Torque_max	47.76	39.65	1894	68.0	45.5	324.0	17.1	106.0

Fuente: [18]

El peso del motor SAW 408 es de 5,4 Kg y el precio del motor es de 412,4 euros.

8.3 ANEXO 3

La prueba del motor G25 Crystalyte a 36V suministrada por la empresa fabricante del motor fue el siguiente:

Omschrijving	U	I	P1	M	N	P2	Eff
	(V)	(A)	(W)	(N.m)	(rpm)	(W)	(%)
Unload	35,97	1,340	48,22	0,03	277,1	0,87	1,8
Max-Eff	35,77	6,744	241,3	6,97	225,6	164,6	68,2
Max P-out	35,33	18,35	648,4	21,59	137,8	311,4	48,0
Max-Torque	35,19	23,08	812,6	31,33	41,2	135,1	16,6
End	35,19	23,08	812,6	31,33	41,2	135,1	16,6

Fuente: [18]

Detalles técnicos del motor suministrados por la empresa fabricante del motor:

Technical details

Motor type	Brushless direct drive
Output range	250 - 400 Watt
Voltage range	24 - 48 Volt
Maximal Amp	20 Amp
RPM / V	6,5
Torque	25 - 40 Nm
Efficiency	78%
Weight	3,8 kg
Drop out	100 mm
Disc brake mounting	Yes
Sprocket gear	n/a
Front or rear wheel	Front wheel
Controller type	Sinwave G controllers

Magnet width	25 mm
Poles	22 pair
Hall sensors	3 x Honeywell
Bearings	NSK industrial
Sealings	Yes
Motor phase plug	3 x Anderson PP30
Hall sensor plug	Mini XLR 5 pin

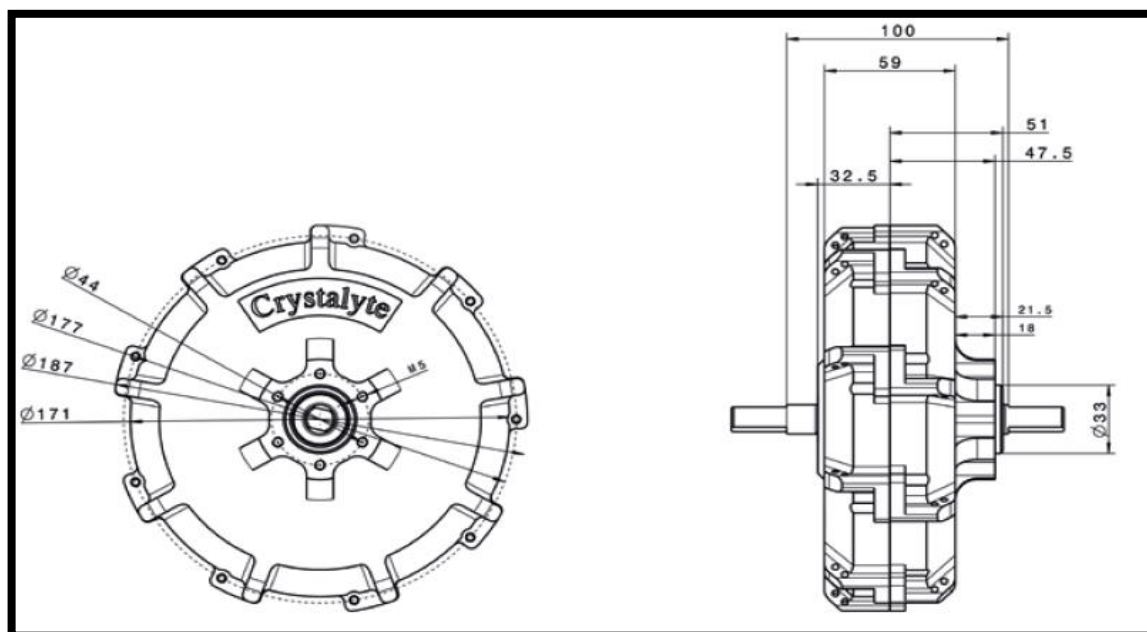
ALSO AVAILABLE WITH RIM & SPOKES

Spokes	SAPIM 13G INOX (size = 2,3 mm)
Rim	EXAL EX19 (24" - 29") / XL25 (20")
Rim sizes	20", 24", 26", 28" and 29er

AVAILABLE WITH RIM & SPOKES

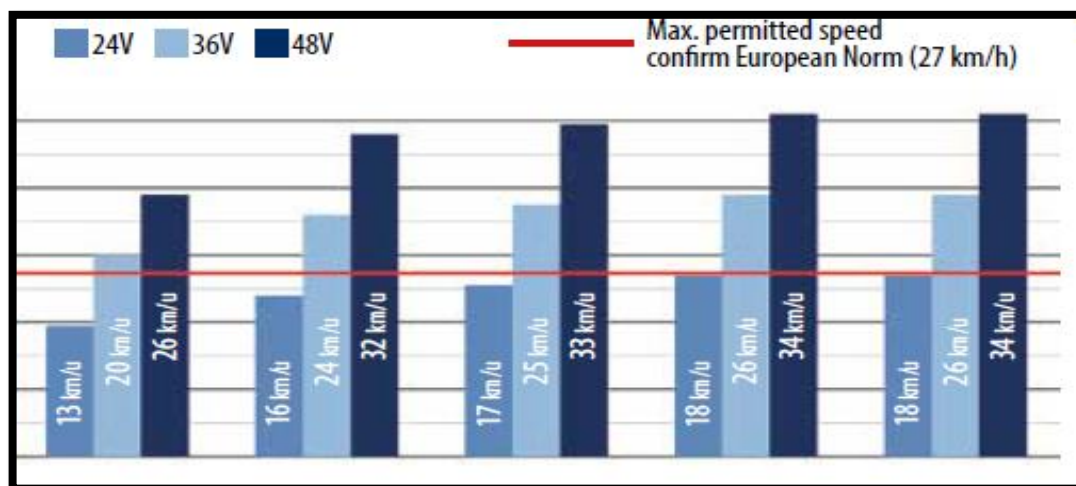
Fuente: [18]

Las dimensiones del motor son las siguientes:



Fuente: [18]

La información de velocidad según la magnitud de alimentación del motor y el tipo de rin en cual se instale el motor [20"-24"-28"-29"].



Fuente: [18]

El peso del motor G25 Crystalyte es de 3,8 Kg y el precio del motor es de 310 euros.

8.4 ANEXO 4

La prueba del motor HT3525 Crystalyte a 36V suministrada por la empresa fabricante del motor fue el siguiente:

Description	U (V)	I (A)	P1 (W)	M (N.m)	N (rpm)	P2 (W)	Eff (%)
Unload	35,94	0,918	33,00	0,04	250,0	1,04	3,1
Max-Eff	35,51	8,837	313,9	11,61	222,5	270,4	86,1
Max P-out	34,87	25,41	886,5	37,04	170,7	661,9	74,6
Max-Torque	34,87	26,53	925,3	60,16	46,1	290,3	31,3
End	34,87	26,53	925,3	60,16	46,1	290,3	31,3

Fuente: [18]


Detalles técnicos del motor suministrados por la empresa fabricante del motor:

Technical details







Motor type	Brushless direct drive	Magnet width	35 mm
Output range	250 - 2000 Watt	Poles	23 pair
Voltage range	24 - 72 Volt	Hall sensors	3 x Honeywell
Maximal Amp	45 Amp	Bearings	NSK industrial
RPM / V	6,5	Sealings	Yes
Torque	40 - 90 Nm	Motor phase plug	3 x Anderson PP45
Efficiency	86%	Hall sensor plug	Mini XLR 5 pin
Weight	6,5 kg		
Drop out	100 mm		
Disc brake mounting	Yes		
Freewheel mounting	n/a		
Front or rear wheel	Front wheel		
Controller type	Sensorless and sensored controllers		

ALSO AVAILABLE WITH RIM & SPOKES

Spokes	SAPIM 12G INOX (size = 2,6 mm)
Rim	EXAL EX19 (24" - 29") / XL25 (20")
Rim sizes	20", 24", 26", 28" and 29er

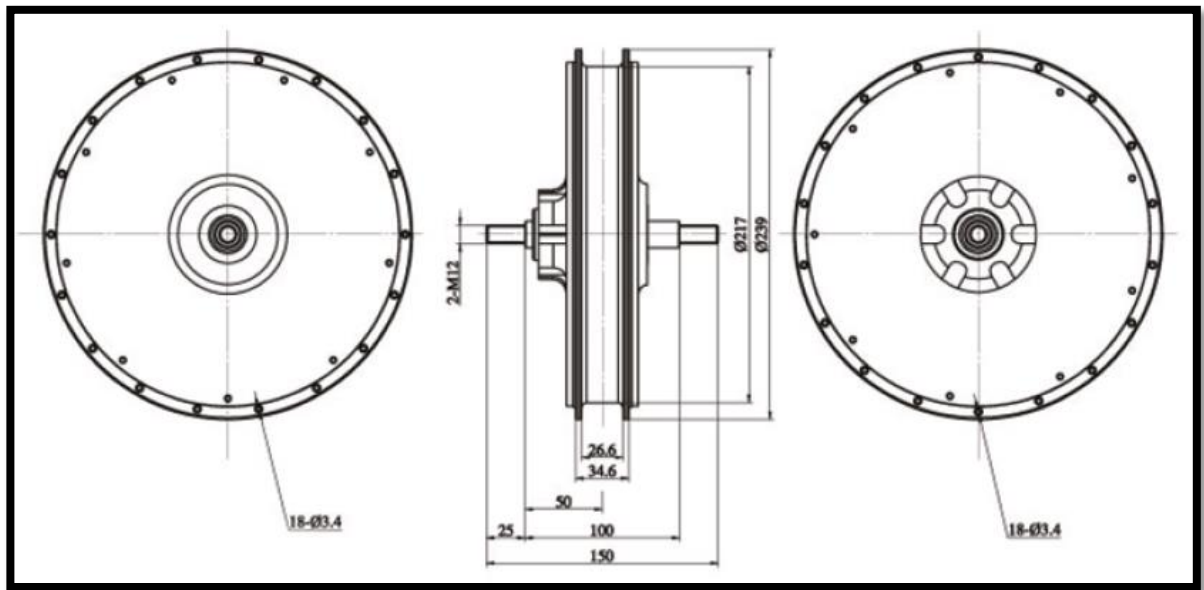


AVAILABLE WITH RIM & SPOKES

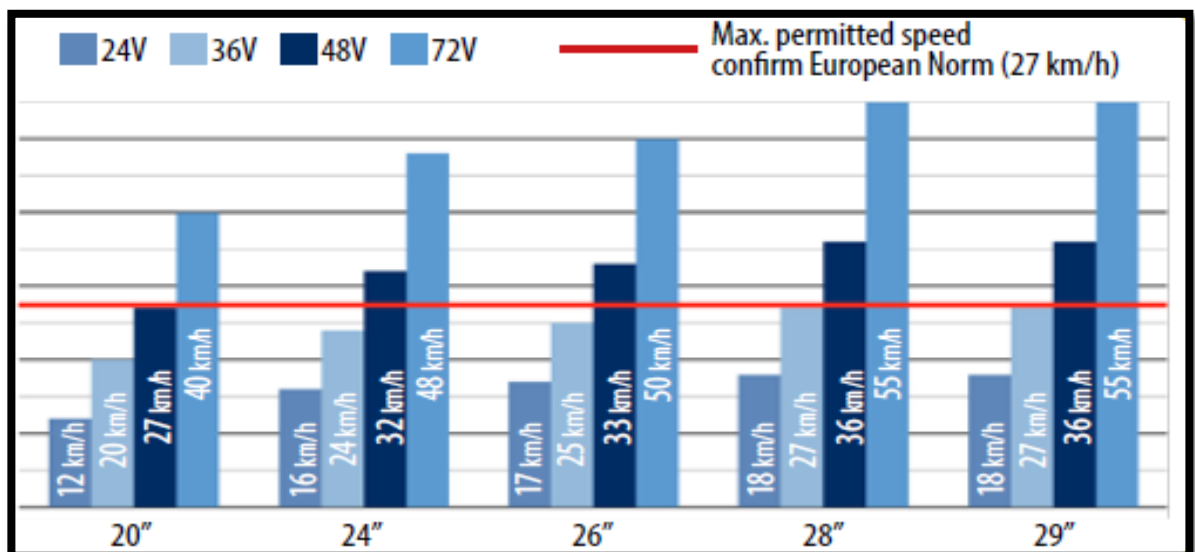
Fuente: [18]

Las dimensiones del motor son las siguientes:



Fuente: [18]

La información de velocidad según la magnitud de alimentación del motor y el tipo de rin en cual se instale el motor [20"-24"-28"-29"].



Fuente: [18]

El peso del motor HT3525 Crystalyte es de 6,5 Kg y el precio del motor es de 345 euros.

8.5 ANEXO 5

Los parámetros de la batería Lithium Battery Pack DLP-01 suministrados por el fabricante Golden Motor fueron los siguientes:

Tensión [V]	36 V
Máxima corriente de carga [A]	25 A
Carga corriente continua [A]	2-3 A
Dimensión [L*W*H]	375*90*83 mm
Peso [Kg]	3,6Kg
Precio [€]	229 Euros
Capacidad [Ah]	11,6 Ah
Modelo	Lithium Battery Pack DLP

La batería tiene incorporado el cargador de la siguiente manera:



Fuente: [21]

8.6 ANEXO 6

Los parámetros de la batería B36LiM-DT suministrados por el fabricante Golden Motor son los siguientes:

Tensión [V]	36 V
Máxima corriente de carga [A]	25 A
Carga corriente continua [A]	2 A
Dimensión [L*W*H]	375*89*90 mm
Peso [Kg]	3,3 Kg
Precio [€]	347,254 Euros
Capacidad [Ah]	14 Ah
Modelo	B36LiM-DT

La batería tiene incorporado el cargador de la siguiente manera:



Fuente: [24]

8.7 ANEXO 7

Las especificaciones eléctricas suministradas por la empresa del controlador modelo G4825-GR son las siguientes:

	C4820-GR	C4825-GR	C4835-GR	C7240-GR
Battery Current (+2% / - 10%)	20 A	25 A	35 A	40 A
Phase Current Limit (+/- 10%)	50 A	75 A	90 A	120 A
Nominal Battery Voltage	36V-52V	36V-52V	36V-52V	36V-72V
MOSFETs	6x		12x	
	AOT460	IRFB4110	AOT460	IRFB4110
Max Regen Voltage (+/- 2%)	58 V	58 V	58 V	88 V
Low Voltage Cutoff (+/- 2%)	27 V	27 V	27 V	31 V
Control Chip	XCKJ3232C			
eRPM Limit Sensorless	~28,000			





Fuente: [24]

Las especificaciones mecánicas del controlador que se deben tener en cuenta para la ubicación del controlador en la bicicleta son las siguientes:

	C4820	C4825	C4835	C7240
Dimensions (mm)	110x71x34		154x87x46	
Weight (kg)	0.47	0.49	0.75	0.78
Chassis Material	Extruded Aluminum			
DC Battery Connector	Genuine Anderson Power Poles			
Motor Phase Connector	Genuine Anderson Power Poles			
Hall Sensor Connector	JST-SM Series			
Other Signal Connectors	JST-SM Series			
Waterproofing	Gasketed at end plates and wire exits, sealed switch			

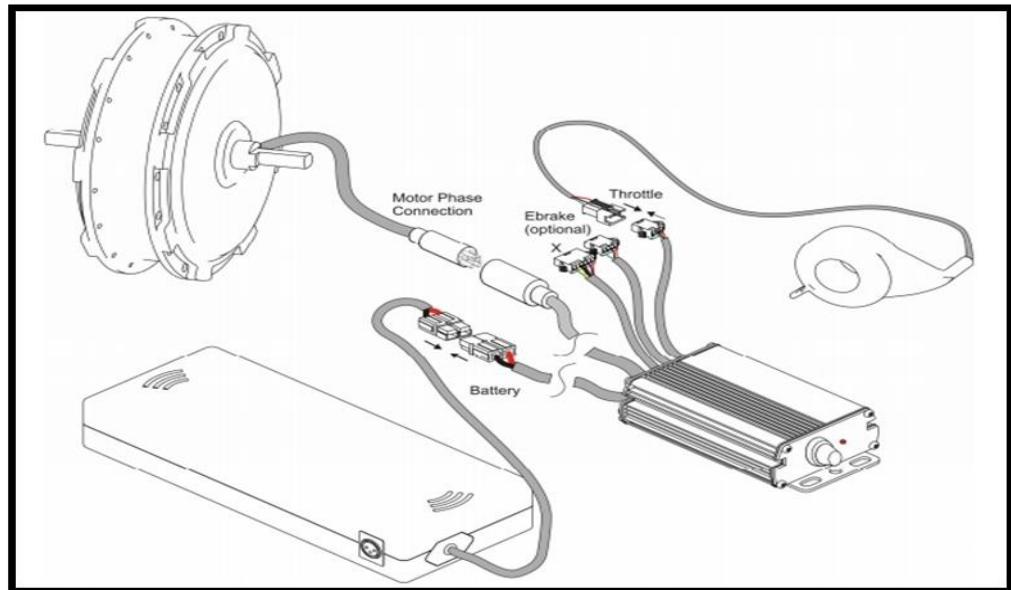
Fuente: [24]

Las conexiones de salida que deben instalarse son las siguientes:

	Throttle*: 1=4.3V 2=Gnd 3=Signal:1-3.6V
	Ebrake: 1=5V 2=Gnd 3=NC 4=Ebrake
	Hall Sensor**: 1=Gnd 2=Yellow 3= Green 4=Blue 5=5V
	Cycle Analyst***: 1=Vbatt 2=Gnd 3= -Shunt 4=+Shunt 5=Hall 6=Throt

Fuente: [24]

EL diagrama de conexiones del sistema puede realizarse de la siguiente manera:



Fuente: [24]

El precio del controlador C4825 es de 103 Euros.